



# **Modelación estratégica del transporte fluvial de pasajeros: El caso del Río Magdalena.**

Por

Laura Patricia Berrío Hernández

Ingeniero Civil, Universidad del Norte (2009)

Presentado al Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental en el cumplimiento de los requisitos para el grado de:

Magister en Ingeniería Civil

Énfasis en Vías y Transporte

Universidad del Norte

Bajo la supervisión de:

Victor Cantillo Maza

Barranquilla, 2015

*Agradezco a mis padres por su apoyo incondicional,  
a mi hermana por ser un gran modelo a seguir,  
a mis profesores, en especial a Victor Cantillo,  
por guiarme y ayudarme en cada paso del camino.*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b>	<b>VII</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>8</b>
1.1 ANTECEDENTES	9
1.2 OBJETIVOS	11
1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	11
1.4 CONTRIBUCIONES	12
<b>2 MODELACIÓN DE LA DEMANDA Y LA OFERTA DE TRANSPORTE</b>	<b>14</b>
2.1 MODELO CLÁSICO	14
2.1.1 MODELOS DE GENERACIÓN Y ATRACCIÓN	15
2.1.2 DISTRIBUCIÓN DE VIAJES	16
2.1.3 MODELOS DE ELECCIÓN DISCRETA	19
2.1.4 MODELO DE ASIGNACIÓN	22
2.2 MODELOS DE DEMANDA DIRECTA	26
<b>3 RECOLECCIÓN Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN</b>	<b>28</b>
3.1 VEHÍCULOS	28
3.2 ZONA DE ESTUDIO	28
3.3 CARACTERIZACIÓN DE LA MOVILIDAD EN EL RÍO MAGDALENA	29
3.3.1 MODELOS SERIES DE TIEMPO PARA EL NÚMERO DE PASAJEROS QUE ENTRAN Y SALEN POR PUERTO.	31
3.4 TOMA DE DATOS	42
3.5 ZONIFICACIÓN	44
3.5.1 CRITERIO DE ZONIFICACIÓN	45
3.5.2 CODIFICACIÓN Y NOMENCLATURA DE LAS ZONAS	46
3.5.3 ZONAS	46
3.6 CÁLCULO DE LAS MATRICES	48
3.7 ANÁLISIS DE LAS MATRICES ORIGEN – DESTINO	49
3.7.1 ZONA CALAMAR	50
3.7.2 ZONA MAGANGUÉ	50
3.7.3 ZONA EL BANCO	51
3.7.4 ZONA GAMARRA	52
3.7.5 ZONA BARRANCABERMEJA	53

3.7.6	ZONA PUERTO BOYACÁ	53
3.7.7	ZONA PUERTO BERRÍO	54
3.7.8	ZONA PUERTO NARE	54
3.7.9	SÍNTESIS DEL DÍA TÍPICO	55
<b>4</b>	<b>MODELACIÓN CLÁSICA</b>	<b>57</b>
<b>4.1</b>	<b>MODELO DE GENERACIÓN Y ATRACCIÓN</b>	<b>57</b>
4.1.1	VARIABLES	57
4.1.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO DE GENERACIÓN.	58
4.1.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO DE ATRACCIÓN	60
<b>4.2</b>	<b>PROYECCIÓN DE LOS VIAJES GENERADOS Y ATRAÍDOS</b>	<b>61</b>
<b>4.3</b>	<b>MODELO DE DISTRIBUCIÓN</b>	<b>65</b>
4.3.1	PROYECCIONES.	65
<b>4.4</b>	<b>MODELO DE ASIGNACIÓN</b>	<b>67</b>
4.4.1	PROYECCIONES	75
<b>5</b>	<b>MODELOS ALTERNATIVOS DE DEMANDA</b>	<b>82</b>
<b>5.1</b>	<b>PARTICIÓN MODAL</b>	<b>82</b>
5.1.1	VALOR DEL TIEMPO	83
5.1.2	ANÁLISIS DE ELASTICIDADES	84
<b>5.2</b>	<b>MODELO DE DEMANDA DIRECTA</b>	<b>87</b>
<b>5.3</b>	<b>MODELO DE ELECCIÓN DE DESTINO</b>	<b>88</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>91</b>
<b>7</b>	<b>REFERENCIA</b>	<b>94</b>

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 ZONA DE ESTUDIO .....	10
FIGURA 2.1 ESQUEMA DEL MODELO CLÁSICO .....	14
FIGURA 2.2 ESTRUCTURA DE LA MATRIZ ORIGEN- DESTINO .....	17
FIGURA 3.1 ZONA DE ESTUDIO .....	29
FIGURA 3.2 PASAJEROS MOVILIZADOS POR CADA PUERTO.....	30
FIGURA 3.3 NÚMERO DE VIAJES QUE ENTRAN AL PUERTO DE CALAMAR .....	32
FIGURA 3.4 NÚMERO DE VIAJES QUE SALEN DEL PUERTO DE CALAMAR .....	32
FIGURA 3.5 NÚMERO DE VIAJES QUE ENTRAN AL PUERTO DE MAGANGUÉ. ....	33
FIGURA 3.6 NÚMERO DE VIAJES QUE SALEN DEL PUERTO DE MAGANGUÉ .....	34
FIGURA 3.7 NÚMERO DE VIAJES QUE ENTRAN AL PUERTO DE EL BANCO .....	35
FIGURA 3.8 NÚMERO DE VIAJES QUE SALEN DEL PUERTO DE EL BANCO .....	35
FIGURA 3.9 NÚMERO DE VIAJES QUE ENTRAN AL PUERTO DE GAMARRA.....	36
FIGURA 3.10 NÚMERO DE VIAJES QUE SALEN DEL PUERTO DE GAMARRA.....	37
FIGURA 3.11 NÚMERO DE VIAJES QUE ENTRAN AL PUERTO DE BARRANCABERMEJA.....	38
FIGURA 3.12 NÚMERO DE VIAJES QUE SALEN DEL PUERTO DE BARRANCABERMEJA .....	38
FIGURA 3.13 NÚMERO DE VIAJES QUE ENTRAN A PUERTO BERRÍO.....	39
FIGURA 3.14 NÚMERO DE VIAJES QUE SALEN DE PUERTO BERRÍO .....	40
FIGURA 3.15 NÚMERO DE VIAJES QUE ENTRAN A PUERTO BOYACÁ.....	41
FIGURA 3.16 NÚMERO DE VIAJES QUE SALEN DE PUERTO BOYACÁ. ....	41
FIGURA 3.17 FORMATO DE AFORO DE EMBARCACIONES. ....	42
FIGURA 3.18 FORMATO DE ENCUESTA DE PREFERENCIA REVELADA .....	43
FIGURA 3.19 EJEMPLO DE ESCENARIO HIPOTÉTICO PRESENTADO EN LA ENCUESTA PD .....	44
FIGURA 3.20 DIAGRAMA DE MATRIZ DE VIAJES SEGÚN LAS ZONAS .....	45
FIGURA 3.21 ZONIFICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	47
FIGURA 3.22 MACROZONAS.....	48
FIGURA 4.1 GENERACIÓN DE VIAJES EN EL AÑO 2009 EN MACRO-ZONAS.....	60
FIGURA 4.2 ATRACCIÓN DE VIAJES EN EL AÑO 2009 EN MACRO-ZONAS.....	61
FIGURA 4.3 GENERACIÓN ESTIMADA PARA EL AÑO 2015 EN MACRO-ZONAS .....	63
FIGURA 4.4 GENERACIÓN ESTIMADA PARA EL AÑO 2020 EN MACRO-ZONAS .....	63
FIGURA 4.5 ATRACCIÓN ESTIMADA PARA EL AÑO 2015 EN MACRO-ZONAS .....	64
FIGURA 4.6 ATRACCIÓN ESTIMADA PARA EL AÑO 2020 EN MACRO-ZONAS .....	64
FIGURA 4.7 ASIGNACIÓN DE FLUJOS EN LA RED FLUVIAL .....	69
FIGURA 4.8 FLUJOS TOTALES EN LOS ALREDEDORES DE CALAMAR .....	70
FIGURA 4.9 FLUJOS TOTALES DE LOS ARCOS ENTRE MAGANGUÉ Y EL BANCO.....	71
FIGURA 4.10 FLUJOS TOTALES DE LOS ARCOS ALREDEDOR DE MAGANGUÉ.....	72
FIGURA 4.11 FLUJOS EN LOS ARCOS ENTRE EL BANCO Y GAMARRA .....	73
FIGURA 4.12 FLUJOS EN LOS ARCOS ENTRE GAMARRA Y PUERTO BOYACÁ .....	74
FIGURA 4.13 FLUJOS TOTALES FUTUROS DE LA ZONA DE CALAMAR Y CERCANOS. ....	76
FIGURA 4.14 FLUJOS TOTALES FUTUROS ZONA DE MAGANGUÉ Y MUNICIPIOS CERCANOS. ....	77
FIGURA 4.15 FLUJOS TOTALES DE LOS ARCOS ENTRE MAGANGUÉ Y EL BANCO .....	78
FIGURA 4.16 FLUJOS TOTALES FUTUROS DE LOS ARCOS ENTRE MAGANGUÉ Y GAMARRA .....	79
FIGURA 4.17 FLUJOS TOTALES FUTUROS DE LOS ARCOS ENTRE GAMARRA Y PUERTO BOYACÁ .....	80
FIGURA 5.1 DISTRIBUCIÓN DE ELASTICIDADES DEL MODO CARRETERO (BUS).....	85
FIGURA 5.2 DISTRIBUCIÓN DE ELASTICIDADES DEL MODO FLUVIAL (CHALUPA) .....	86

## INDICE DE TABLAS

TABLA 3.1 PUERTOS DE AFORO .....	29
TABLA 3.2. MODELOS DE AJUSTE PARA LA SERIE HISTORICA .....	31
TABLA 3.3 ZONAS EXTERNAS INTERNACIONALES .....	46
TABLA 3.4 CANTIDAD DE VIAJES AL DÍA CON ORIGEN Y DESTINO DE LOS PUERTOS ESTUDIADOS .....	50
TABLA 3.5 CANTIDAD DE VIAJES GENERADOS Y ATRAÍDOS EN LA ZONA DE CALAMAR .....	50
TABLA 3.6 CANTIDAD DE VIAJES GENERADOS Y ATRAÍDOS EN LA ZONA MAGANGUÉ .....	51
TABLA 3.7 CANTIDAD DE VIAJES GENERADOS Y ATRAÍDOS EN LA ZONA EL BANCO .....	52
TABLA 3.8 CANTIDAD DE VIAJES GENERADOS Y ATRAÍDOS EN LA ZONA GAMARRA .....	52
TABLA 3.9 CANTIDAD DE VIAJES GENERADOS Y ATRAÍDOS EN LA ZONA BARRANCABERMEJA .....	53
TABLA 3.10 CANTIDAD DE VIAJES GENERADOS Y ATRAÍDOS EN LA ZONA PUERTO BOYACÁ .....	53
TABLA 3.11 CANTIDAD DE VIAJES GENERADOS Y ATRAÍDOS EN LA ZONA PUERTO BERRÍO .....	54
TABLA 3.12. CANTIDAD DE VIAJES GENERADOS Y ATRAÍDOS EN LA ZONA PUERTO NARE .....	54
TABLA 3.13 FLUJO DE EMBARCACIONES DÍA TÍPICO. ....	55
TABLA 3.14 FLUJO DE PASAJEROS POR PUERTO POR DÍA. ....	55
TABLA 3.15 OFERTA Y DEMANDA DÍA TÍPICO. ....	56
TABLA 4.1. NÚMERO GLOBAL DE VIAJES GENERADOS Y ATRAÍDOS DEL AÑO ACTUAL Y PROYECTADO .....	62
TABLA 4.2. DISTRIBUCIÓN DE VIAJES FUTUROS EN MACRO-ZONAS .....	66
TABLA 4.3. VALORES MÍNIMOS Y MÁXIMOS PARA DISTINTOS ATRIBUTOS DEL VIAJE. ....	75
TABLA 4.4. VALORES MÍNIMOS Y MÁXIMOS PARA DISTINTOS ATRIBUTOS DEL VIAJE. (ESCENARIO FUTURO) .....	81
TABLA 5.1. PARÁMETROS DE LAS FUNCIONES DE UTILIDAD DEL MODELO DE PARTICIÓN MODAL .....	83
TABLA 5.2. ELASTICIDADES POR VARIABLE Y POR MODO .....	85
TABLA 5.3. CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS DEL MODELO DE DEMANDA DIRECTA .....	88
TABLA 5.4. PARÁMETROS CALIBRADOS DE LA FUNCIÓN DE UTILIDAD DEL MODELO DE ELECCIÓN DE DESTINO .....	89
TABLA 5.5. PARÁMETROS CALIBRADOS DE LA FUNCIÓN DE UTILIDAD DEL MODELO DE ELECCIÓN DE DESTINO .....	90

# **Modelación estratégica del transporte fluvial de pasajeros: El caso del Río Magdalena.**

## **RESUMEN**

La modelación estratégica del transporte permite representar los elementos que definen un sistema de interés, a partir de aproximaciones matemáticas que se desarrollan de acuerdo al análisis particular que se llevará a cabo. Una metodología que se destaca es el modelo clásico, que permite caracterizar un sistema de transporte a partir de datos agregados, lo cual resulta ideal para el estudio de casos con escasa información o difícil acceso.

En este orden de ideas, la aplicación de un modelo clásico para el transporte de pasajero en el modo fluvial, constituye un avance importante en la estructuración de los sistemas que incorporen este medio de transporte, ya que a nivel general son escasos los estudios realizados con respecto al tema, al igual que la información recolectada. Específicamente, en Colombia solo se cuenta con el número de pasajeros que entran y salen de cada puerto, desconociendo las características socioeconómicas de los pasajeros que usan el modo y los detalles de los viajes que se llevan a cabo por esta vía.

Con este propósito se recolectó información en la arteria fluvial que mueve el mayor número de pasajeros en el país: el río Magdalena; contemplando tanto los servicios ofrecidos, como los rasgos de los usuarios y de los viajes realizados a través de esta vía y a partir de lo cual se desarrollaron las etapas del modelo clásico y adicionalmente se aplicaron aproximaciones alternativas que enmarcan, a partir de un conjunto de variables definidas previamente, el patrón de comportamiento del modo.

## 1 INTRODUCCIÓN

A nivel general, el transporte fluvial aún sigue siendo considerado un modo eficiente, seguro y amigable con el ambiente (Rochács & Simongáti, 2010). Aunque posee las limitaciones de accesibilidad, en los sectores en que se cuenta con arcos navegables, resulta una opción deseable, de manera alternativa al transporte carretero, especialmente en territorio latinoamericano, donde su superficie corresponde solo al 12% del total mundial y sin embargo su escorrentía fluvial constituye el 25.5% del total del Planeta (Hernández Luis, 2006).

Específicamente, en Colombia se cuenta con varias arterias fluviales navegables, que aún hoy son utilizados para el transporte de pasajeros y mercancías, la principal es el río Magdalena, el cual será el objeto de estudio del presente documento.

Existen muy pocas referencias en la literatura sobre estudios e investigaciones acerca del transporte fluvial de pasajeros. Actualmente, solo se recopila información relativa al número de usuarios que entran y salen de cada puerto en el cual existe una inspección fluvial, lo que dificulta el planteamiento de modelos estratégicos, que lleven a la toma de decisiones respecto a las políticas de transporte que influyan de manera directa al modo.

Dado los escasos antecedentes disponibles, resulta complejo definir una aproximación para estimar la demanda y la oferta del transporte fluvial; no obstante, de la experiencia que se tiene del estudio de los otros modos se puede suponer los criterios de recolección de información de los vehículos y de los pasajeros, que posteriormente será útil para el análisis y la etapa de modelación (Ortúzar y Willumsen, 2011).

Con el fin de determinar la demanda y oferta actual del transporte de pasajeros en el modo fluvial, se realizó un estudio del caso del río Magdalena, que es la arteria fluvial con mayor movimiento de pasajeros en Colombia e incluso es el único medio de acceso disponible en algunas regiones del país. Para ello resulta necesario obtener información secundaria que permita generar un diagnóstico preliminar del sistema de transporte y sus usuarios y que sirva de base de análisis de las variables que influyen en la dinámica del mismo. Así mismo, se requiere información primaria, que sirva de insumo principal para el desarrollo de modelos que caractericen el transporte de pasajeros en el modo fluvial, por este motivo se aplicaron encuestas de preferencia revelada y preferencia declarada, además de aforar el número de embarcaciones y de pasajeros que se movilizan en 7 puertos principales del río Magdalena.

El enfoque utilizado para la modelación es una adaptación del modelo clásico de cuatro etapas y adicionalmente, se estimó un modelo simplificado o sintético de demanda directa. De esta manera, a través de la investigación se utilizan varias aproximaciones de modelación de la demanda de transporte con el propósito de establecer análisis comparativos y verificar la conveniencia en el uso de ellas.



Inicialmente, el documento presenta una descripción teórica de los modelos utilizados, empezando con la modelación clásica de cuatro etapas. La primera, corresponde al análisis de la generación y atracción de viajes; la cual resulta importante porque permite determinar la relación entre variables propias de los pasajeros y el número de viajes que permiten estimar escenarios futuros a partir de la proyección de las mismas variables (Cascetta, 2009). La segunda etapa o modelo de distribución, permite estimar el número de viajes entre cada par de zonas a partir del conocimiento de una función de costo generalizado y el total de viajes generados y atraídos (Ortuzar y Willumsen, 2011). La tercera etapa es la elección de modo; la cual se encuentra enmarcada en el concepto de elecciones discretas, donde se analiza los factores que influyen en la decisión que hace un usuario al escoger la alternativa modal que maximiza su utilidad dentro de un conjunto de alternativas disponibles (Mc Fadden, 2001). Complementario al modelo clásico de demanda, se incluyó la estimación de un modelo de elección de destino, basado en la teoría de elección discreta.

La última etapa del modelo clásico se denomina asignación (Sheffi, 1985; Bell and Iida, 1997) y corresponde a la distribución de los flujos entre las posibles rutas establecidas dentro de la oferta de transporte, considerando ciertas características específicas. Cabe destacar que en el caso del transporte fluvial, la red de transporte resulta ser poco densa en comparación con la de otros modos de transporte de pasajeros.

En la modelación de transporte, existen diferentes metodologías para establecer el número de viajes entre un par origen-destino, a partir de variables externas. Una técnica alternativa a la modelación clásica, es la estimación de demanda directa, que utiliza variables socioeconómicas y relativas al viaje, para su calibración.

En el tercer capítulo de este documento se presenta el planteamiento del estudio, se describe el contexto geográfico de análisis y se puntualizan las consideraciones y supuestos empleados. Luego, en el capítulo cuatro se presentan la estimación de los submodelos del enfoque tradicional de cuatro etapas, detallando las consideraciones pertinentes de cada uno de ellos. En el quinto capítulo se presentan enfoques de modelación de demanda alternativos, en particular modelos sintéticos y series de tiempo. Finalmente se presentan las conclusiones relevantes derivadas del análisis de resultados de los modelos establecidos.

## **1.1 Antecedentes**

El río Magdalena, la arteria fluvial más importante del país, nace en el sur de Colombia y lo atraviesa siguiendo dirección norte hasta desembocar en el mar Caribe. Sigue un recorrido aproximado de 1500 km, de los cuales casi 1000 km son navegables. En su recorrido se encuentran varios puertos principales, como Puerto Berrío, Barrancabermeja, Gamarra, El Banco, Magangué (ver Figura 3.1).

Figura 1.1 Zona de estudio



Fuente: Estudio del Sistema Integrado de Transporte SIT Caribe, Tomo I, Capítulo 3.

Varios de los municipios ribereños han usado el río como medio principal de transporte, en particular aquellos cuya infraestructura vial es deficiente y por ende encuentran la mejor –o única- opción de transporte en el modo fluvial. Es así como en amplios sectores de los departamentos de Bolívar, Magdalena, Cesar, Santander, Antioquia, Boyacá y Caldas es el medio de transporte por excelencia.

El principal afluente es el río Cauca, que desemboca en el Magdalena a la altura de Pinillos, que también es utilizado para el transporte de pasajeros, ya que atraviesa zonas cenagosas y encuentran en la unión con el río Magdalena accesibilidad a diversas comunidades. Se destaca también que la zona de la Depresión Momposina se comunica a través del brazo de Mompox con Magangué y El Banco.

La información existente sobre la demanda de pasajeros en el río Magdalena es precaria. Únicamente se tienen registros reportados por las empresas navieras, sobre el número de pasajeros que entra y salen mensualmente de cada puerto en donde existe una inspección

fluvial. Estos datos permiten identificar los movimientos globales, atracciones, generaciones, y variaciones temporales en el flujo de pasajeros en los puertos más importantes, pero no son suficientes para caracterizar la demanda. Además, no se cuenta con información sobre los puertos donde no existe inspección fluvial.

La planificación de los sistemas de transporte ha evolucionado en las últimas décadas. Actualmente, un enfoque adoptado con frecuencia, es el modelar matemáticamente la relación entre el sistema de transporte y las actividades realizadas en cada zona (Manheim, 1979). El modelo clásico es una aproximación agregada que busca explicar la demanda de un sistema de transporte a partir de variables socioeconómicas, variables relacionadas con el uso de suelo y con el servicio prestado. Esta metodología resulta ideal para la planificación de la demanda y oferta de transporte, de extensas áreas o poblaciones de estudio, como es el caso.

Una vez se haya determinado que área será abarcada en la modelación estratégica, se procede a establecer la zonificación, determinando con esta, el nivel de agregación de los datos, lo cual usualmente permite trabajar con la tendencia de comportamiento de una población y no con las decisiones particulares de los individuos, además de simplificar el procesamiento de los datos, ya que así se obtiene una visión general del sistema de transporte, como resultado de la modelación.

Seguido de la zonificación, se inicia con las etapas de modelación. Aunque el proceso es secuencial, en cada etapa se hacen supuestos respecto a parámetros de entrada, que posteriormente son hallados y que por tanto es posible que se requiera hacer iteraciones entre los distintitos sub-modelos.

## **1.2 Objetivos**

A través de la investigación se busca desarrollar modelos que describan el comportamiento de la demanda y la oferta del modo fluvial de pasajeros a partir de información primaria. Para alcanzar este fin, se establecerán los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar instrumentos de toma de información especializado para el modo fluvial, cuya aplicación permita obtener los datos relevantes para llevar a cabo la modelación de la demanda y la oferta del modo.
- Diagnosticar el transporte de pasajeros en el modo fluvial, en el caso del río Magdalena.
- Realizar una modelación estratégica de la demanda y de la oferta, con el propósito de establecer parámetros que influyen en el transporte de pasajeros, en el modo fluvial.

## **1.3 Definición del problema**

A pesar que el transporte fluvial es un modo de transporte de pasajeros con larga tradición en el país, la información disponible se limita al registro del número de pasajeros que

ingresa y que sale de los puertos donde existe inspección fluvial. No se conocen detalles de los viajes; por ejemplo: matrices origen destino, motivos del viaje, información socioeconómica de los viajeros, distribución horaria de los viajes o sobre los atributos que definen el nivel de servicio del transporte fluvial en el país.

Aunque la información existente permite establecer el movimiento global en los puertos con inspecciones, no se tiene información de los puertos intermedios o pequeños. Tampoco se sabe dónde inician o finalizan realmente los viajes, pues es completamente natural que algunos viajes inicien o finalicen en municipios no portuarios, dada la configuración topológica de la red fluvial del país. En otras palabras, se desconoce cuál es la real influencia que existe en las zonas sin acceso directo al río, que permita establecer la necesidad de medios de transporte complementarios para llegar a los puertos.

Es entonces relevante obtener datos concluyentes que permita realizar una caracterización del modo de transporte fluvial. Hoy en día no se tienen definidos instrumentos ni estrategias para la toma de datos que permita obtener esta información de manera eficiente para este modo de transporte, mucho menos se cuenta con herramientas de modelación estratégica que permita establecer proyecciones de la demanda, estimar los niveles de servicio de la red fluvial de pasajeros, y evaluar proyectos o políticas que busquen beneficiar a las comunidades que utilizan la red fluvial para sus desplazamientos.

#### **1.4 Contribuciones**

En primer lugar, se diseña un instrumento de toma de datos que permita recolectar información primaria, conforme a los requisitos particulares del modo, que será un insumo importante en la caracterización del transporte fluvial de pasajeros. Este diseño podrá servir de base para futuros estudios en el área.

La aplicación de los instrumentos en siete puertos permitió la validación de su diseño y la recolección de datos relevante, que en conjunto con la información secundaria obtenida sentaron las bases del diagnóstico del transporte de pasajeros en modo fluvial y se logró una caracterización socioeconómica de los usuarios, además de esclarecer la zona de influencia del río Magdalena, dejando en evidencia la población de los distintos municipios que utilizan el modo como alternativa de transporte. De igual manera se estableció cual es la distribución de los viajes que se referencia en cada puerto.

Los datos recolectados de las encuestas de preferencias declaradas y reveladas han permitido evaluar el comportamiento de los usuarios del modo y conocer la valoración que estos otorgan a ciertos atributos del sistema, bajo las condiciones del viaje que se está realizando y si se presentan cambios en las alternativas entre las que el pasajero puede escoger.

A través de la investigación se han desarrollado diversas aproximaciones de modelación de la demanda y la oferta. Se destaca que en las etapas de generación y atracción se ha

involucrado la variable accesibilidad, la cual permite introducir elasticidad en esta etapa respecto de los niveles de servicio.

En la etapa de distribución se estimaron modelos gravitacionales, continuando con la modelación de las cuatro etapas, la cual permite caracterizar la demanda de transporte fluvial, a partir de datos agregados y siguiendo tendencias generales. Complementario a esto, se desarrolló un modelo de elección de destino, usando la teoría de elecciones discretas, que permite modelar el comportamiento de los usuarios con base en sus decisiones particulares, siendo así más sensible a ciertas variables.

Alternativo a las etapas de la modelación clásica, se incluyó el desarrollo de la metodología de demanda directa, el cual sintetiza todo el proceso de caracterización de la demanda. En ambas metodologías se puede evaluar las variables que influyen en los viajes generados entre cada par de zonas origen destino, sin embargo en la primera se logra determinar la afectación de características específicas, como por ejemplo el efecto de la resistencia a viajar entre cada par origen destino, en la etapa de distribución; mientras que en la segunda se logra simplificar el proceso y minimizar errores.

Los modelos desarrollados permiten determinar el comportamiento de los usuarios de los servicios de transporte ofrecidos en el modo fluvial de mejor manera, así como determinar parámetros que constituyen herramientas útiles para la planeación, la evaluación de proyectos y la generación de políticas, al igual que dar lineamientos de los aspectos que deben ser investigados para tener una caracterización apropiada del transporte fluvial de pasajeros y por tanto conocer los elementos puntuales que deben ser considerados en la toma de decisiones que involucren el modo.

## 2 MODELACIÓN DE LA DEMANDA Y LA OFERTA DE TRANSPORTE

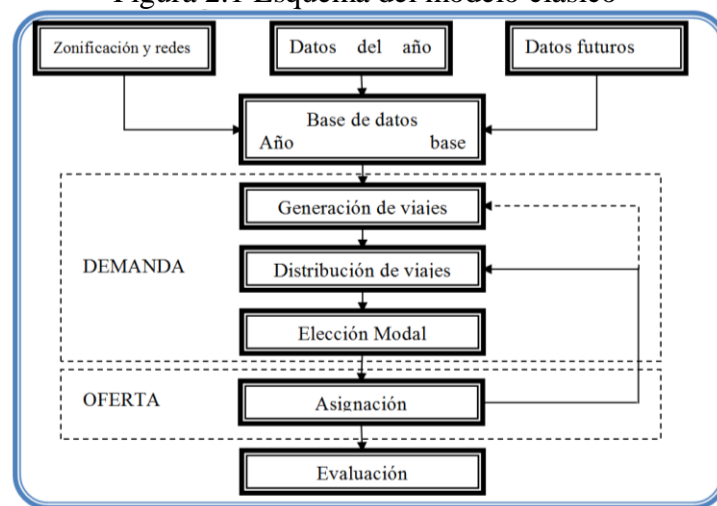
En la modelación estratégica de transporte, es frecuente el uso de la modelación de cuatro etapas, para la planeación de sistemas de transporte, ya que esta metodología permite caracterizar la demanda del mismo, utilizando datos agregados de subdivisiones del área de estudio. Sin embargo en la literatura se encuentran diferentes metodologías que permiten evaluar distintos aspectos de la demanda, siendo tan sofisticados y complejos como los datos tomados lo permitan.

### 2.1 Modelo clásico

El modelo clásico de transporte involucra 4 etapas: generación, distribución, partición modal y asignación. Los distintos aspectos de la demanda se tratan en las tres primeras fases, mientras que la oferta y las condiciones de equilibrio, bajo el supuesto que la demanda es un dato fijo, se abordan en la cuarta.

Para el desarrollo del modelo clásico, es necesario obtener información de los usuarios, del sistema de transporte e incluso información fundamental de la zona de influencia del estudio para el año base. Así mismo se debe definir la proyección para años futuros, de modo que se puedan realizar estimaciones a partir de los modelos calibrados. También resulta importante definir el nivel de agregación de los datos, estableciendo cual será la división de la zona de estudio, mediante criterios que definan la homogeneidad de cada zona, de modo que la agregación de los viajes responda a cierta tendencia, en capítulos posteriores se establecerán los criterios de zonificación, de acuerdo a los requerimientos del caso del río Magdalena. En la Figura 2.1 se presenta un diagrama del proceso que sigue la modelación.

Figura 2.1 Esquema del modelo clásico



Fuente: Adaptación de Ortúzar y Willumsen (2011)



### 2.1.1 Modelos de generación y atracción

Este modelo tiene dos funciones específicas. La primera es desarrollar una relación entre el número total de viajes generados o atraídos y las variables socioeconómicas de las zonas. El segundo, es estimar los viajes en escenarios futuros a partir de las relaciones establecidas con los datos del año base. Para la calibración del modelo se pueden utilizar varias metodologías, los más comunes son el del factor de crecimiento, el modelo de regresión lineal múltiple, análisis por categorías y el modelo logit de elección de frecuencias (Ortúzar & Willumsen 2011).

El modelo de regresión múltiple permite explicar la variable dependiente  $y_i$  correspondiente al número de viajes generados (o atraídos) por la zona  $i$  durante el período de análisis (en este caso, viajes diarios), a partir de un vector de variables explicativas  $\mathbf{X}$ . La función a estimar tiene la estructura dada por la ecuación 2.1

$$y_i = \alpha_0 + \alpha_1 x_{i1} + \alpha_2 x_{i2} + \alpha_3 x_{i3} + \dots + \alpha_k x_{ik} + \varepsilon_i \quad 2.1$$

En términos generales se parte de aproximaciones iniciales acerca de las variables que pueden influir en la generación o atracción de viajes y son estas las que se utilizan como variables independientes. Para verificar si realmente las variables consideradas describen la generación o atracción de viajes, se realiza una validación de los datos a través de un análisis estadístico y econométrico, a la luz de ciertos criterios ampliamente conocidos.

En primer lugar se debe verificar que el signo de los parámetros hallados sea concordante con lo que el modelador espera, de modo que la variable aporte de manera adecuada al modelo. Por ejemplo, se esperaría que a mayor número de habitantes en una zona, se generaran o atrajeran más viajes. En tal caso, el signo del parámetro asociado al número de habitantes debe ser positivo. Si no es así, el modelo no es coherente (Ortúzar & Willumsen 2011).

Adicionalmente, se realiza la prueba  $t$ , del cual resulta un valor que posee el mismo signo del parámetro de la variable y establece si esta es significativamente diferente de cero. Generalmente, se espera que el valor absoluto  $t$  de Student sea mayor de 1.96, si se obtiene un nivel de confianza del 95%. Se destaca que cuando dos variables están fuertemente correlacionadas, los estimadores tienen alta varianza y covarianza haciendo difícil su estimación. Por tanto, si dos variables están correlacionadas sola una debe incluirse en el modelo (Oyedepo & Makinde, 2009).

Igualmente se calcula el coeficiente de determinación ajustado ( $\hat{R}^2$ ) de la regresión, que es un parámetro definido como la razón entre la variación explicada por el modelo y la variación total.  $\hat{R}^2$  corresponde a un valor ajustado del coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el cual es una medida de la calidad del ajuste y varía entre 0 y 1, siendo un mal ajuste 0 y un ajuste perfecto si  $R^2$  es 1.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)} \quad 2.2$$

El coeficiente de determinación ajustado considera el número de variables explicatorias, y tiene en consideración el hecho de que la inclusión de un nuevo regresor incrementa el  $R^2$ .

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n-k-1}}{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)}{n-1}} = 1 - \frac{S^2}{S_y^2} \quad 2.3$$

Donde:

$S^2$ : es la varianza estimada de la variable dependiente cuando tomamos en cuenta la información de las variables explícitas

$S_y^2$ : Es la varianza estimada de la variable dependiente cuando no tomamos en cuenta la información de las variables explícitas

$k$ : es el número de variables

$n$ : es el número de datos

Es este último valor,  $\bar{R}^2$ , el que se debe tener en consideración a la hora de comparar los modelos entre sí. Cabe aclarar, que si bien este parámetro es de relevancia en la calibración del modelo, no resulta determinante para su revisión; de manera general, resulta de mayor importancia la consistencia del signo, ya que este sí establece una tendencia particular en el comportamiento de los usuarios en el sistema.

### 2.1.2 Distribución de viajes

El modelo de distribución de viajes busca caracterizar el patrón de viajes en la zona de estudio, desarrollando una matriz de origen – destino, en la cual se especifica el número de viajes que se originan en la zona  $i$  y terminan en la zona  $j$ .

En la Figura 2.2. se puede apreciar la estructura de la matriz origen-destino, siendo  $n$ , el número de zonas consideradas;  $T_{ij}$  el número de viajes que va de  $i$  a  $j$ ;  $O_i$  el número total de viajes originados en la zona  $i$  y  $D_j$  el número total de viajes cuyo destino es la zona  $j$ .



Figura 2.2 Estructura de la matriz origen- destino

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{cccccc}
 & Z1 & Z2 & \dots & Zj & \dots & Zn & \sum_i T_{ij} \\
 \begin{array}{c} Z1 \\ Z2 \\ \vdots \\ Zi \\ \vdots \\ Zn \end{array} & \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1j} & \dots & T_{1n} \\ T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2j} & \dots & T_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{i1} & T_{i2} & \dots & T_{ij} & \dots & T_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{n1} & T_{n2} & \dots & T_{jn} & \dots & T_{nn} \end{bmatrix} & \begin{array}{c} O_1 \\ O_2 \\ \vdots \\ O_i \\ \vdots \\ O_n \end{array} \\
 \sum_i T_{ij} & D_1 & D_2 & \dots & D_j & \dots & D_n & \sum_i T_{ij}
 \end{array}
 \end{array}$$

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta que para cada zona, la sumatoria de los viajes que realizan desde ella hacia todas las demás, es el total viajes generados de dicha zona. Igualmente la sumatoria de todos los viajes finalizados en esta serán los viajes atraídos.

$$O_i = \sum_{j=1}^n T_{ij} \quad 2.4$$

$$D_i = \sum_{i=1}^n T_{ij} \quad 2.5$$

En general, los modelos de distribución consideran que los viajes entre un par de zonas aumentan en proporción a los viajes generados en la zona origen y los viajes atraídos en la zona destino, pero disminuyen respecto a las dificultades o resistencias de viajar entre ellos, la cual puede ser representada por una función del costo (Ramírez y Sierra, 1989). Bajo este concepto existe un grupo de modelos aplicables, incluyendo modelos de factor de crecimiento, modelos sintéticos y modelos basados en maximización de entropía.

Los modelos de factor de crecimiento suponen que la distribución futura será similar a la actual, siendo posible obtenerlo conociendo la distribución de los viajes actuales y calculando un factor de crecimiento. Para la calibración de este método se conocen varios procedimientos, como el de factor uniforme, factor promedio, el modelo biproportional, entre otros.

Por su parte, los modelos sintéticos, que al igual que el factor de crecimiento, parten de una matriz inicial de viajes pero se incluyen factores externos que pueden influenciar el cambio en el tiempo de la distribución de los viajes, como puede ser la distancia o el total de viajes realizados. En términos generales este modelo determina el número de viajes entre cada par origen – destino sin utilizar directamente la estructura de los viajes actuales (Ortuzar y Willumsen, 2011). Entre los modelos sintéticos están, los modelos gravitacionales, modelo electrostático, modelo de oportunidades entre otros.

El enfoque de maximización de entropía es más riguroso para explicar la distribución de viajes, permitiendo explicar formalmente el modelo gravitacional. En este estudio, para estimar la distribución futura se generara un modelo gravitacional ajustado a través del método de Hyman.

En este estudio, para los viajes entre zonas internas se estimó un modelo gravitacional que involucra el costo generalizado de viaje entre cada par de zonas. (Cascetta et al, 2006). En la Ecuación 2.6 se puede ver la estructura de la función aplicada en cada par origen-destino.

$$T_{ij} = A_i O_i B_j D_j f(C_{ij}) \quad 2.6$$

Donde  $A_i$  y  $B_j$  son factores de balanceo correspondiente a origen y destino respectivamente. A su vez,  $f(C_{ij})$  es la función de impedancia que describe el factor de resistencia a viajar entre el par de zonas, combinando el costo monetario y el tiempo.

Es posible especificar diferentes funciones de costo, destacando entre ellas la exponencial (Ecuación 2.7), la potencial (Ecuación 2.8) y la Gamma o combinada (Ecuación 2.9). En las funciones indicadas los parámetros  $\beta$ ,  $n$  y  $a$  son parámetros que deben ser calibradas y  $C_{ij}$  es el costo generalizado de viaje.

$$f(C_{ij}) = e^{-\beta(C_{ij})} \quad 2.7$$

$$f(C_{ij}) = C_{ij}^{-n} \quad 2.8$$

$$f(C_{ij}) = a \cdot C_{ij}^{-n} \cdot e^{-\beta(C_{ij})} \quad 2.9$$

La calibración del modelo requiere establecer un sistema de zonificación, definir los periodos de modelación, disponer de una matriz origen destino del año base y disponer de una matriz de costos y tiempos de viajes.

Durante el proceso de estimación de la matriz para un valor dado de  $\beta$  se calcula un factor ( $fa$ ) por el cual se multiplica cada uno de los valores de la función de costo en las celdas, lo que resulta en una matriz inicial que seguidamente se balancea utilizando el procedimiento Furness (Ortúzar y Willumsen, 2008).

$$fa = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n T_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n e^{-\beta(C_{ij})}} \quad 2.10$$

Hay varios distintos métodos para calibrar el parámetro  $\beta$ . La aproximación utilizada en la

investigación es el método de Hyman (1969), que resulta una forma robusta y eficiente de proceder. El objetivo del método es igualar el costo observado ( $c^*$ ) y el valor medio del costo modelado ( $c_\beta$ ) como muestra la Ecuación 2.11. En este caso  $N_{ij}$  es el número total de viajes observados de la zona  $i$  a la  $j$ .

$$c_\beta = \frac{\sum_{ij} [T_{ij}(\beta) \cdot c_{ij}]}{\sum_{ij} T_{ij}(\beta)} = c^* = \frac{\sum_{ij} [N_{ij} \cdot c_{ij}]}{\sum_{ij} N_{ij}} \quad 2.11$$

En una primera iteración es necesario suponer un valor inicial de  $\beta$ , que en términos generales podría ser un valor obtenido en otro estudios; sin embargo, una buena práctica es estimarlo a partir del valor medio de los costos ( $c^*$ ), (ver ecuación 2.12). El paso a seguir es la construcción de una matriz de viajes modelados, donde cada casilla se calcula a partir de la ecuación 2.13

$$\beta_0 = \frac{1}{c^*} \quad 2.12$$

$$V_{ij} = \beta \cdot fa \cdot e^{-\beta(c_{ij})} \quad 2.13$$

### 2.1.3 Modelos de elección discreta

El modelo de elección discreta supone que el usuario  $q$  elegirá aquella alternativa  $j$  dentro de un conjunto de alternativas  $A_j$ , maximizando su utilidad  $U_{jq}$ . Los modelos de elección discreta tienen su soporte en la teoría de la utilidad aleatoria (Domencich & McFadden, 1975). En esta teoría se establece que un individuo a la hora de realizar un viaje debe elegir entre un conjunto de alternativas,  $A_j \in A_{(q)}$ , maximizando la utilidad esperada que le proporciona cada una de las posibles opciones que tiene disponible (Mc Fadden, 2001).

La formulación del modelo bajo esta teoría parte del supuesto de que la utilidad asociada a cada alternativa  $A_j$  es función de los atributos que describen las opciones y las características personales propias del individuo. La utilidad de la alternativa  $A_j$  para el individuo  $q$  se denomina como  $U_{jq}$ , y es conocida sólo parcialmente por el modelador mediante las variables en consideración. La teoría de la utilidad aleatoria plantea que  $U_{jq}$  pueda representarse como la suma de dos componentes: una sistemática, ( $V_{jq}$ ), que es función de un vector de atributos observados  $X_{jq}$ , y una aleatoria ( $\varepsilon_{jq}$ ), que refleja idiosincrasias, gustos particulares, errores de medición, y errores de observación por parte del modelador (Domencich y Mc Fadden, 1975). De esta manera, elecciones del individuo aparentemente inconsistentes, pueden representarse como:

$$U_{jq} = V_{jq} + \varepsilon_{jq} \quad 2.14$$

Formalmente, el individuo  $q$  selecciona la alternativa  $A_j$  en vez de  $A_i$ , si y solo si  $U_{jq} \geq U_{iq} \forall A_i \in A_{(q)}$ . Por la naturaleza estocástica del modelo, solo es posible plantear la probabilidad de que el individuo escoja dicha alternativa como sigue:

$$P_{jq} = \text{prob}\{\varepsilon_{iq} \leq \varepsilon_{jq} + (V_{jq} - V_{iq}), \forall A_i \in A_{(q)}\} \quad 2.15$$

Si  $f(\varepsilon) = f(\varepsilon_1 \dots \varepsilon_N)$  es la función distribución de las variables aleatorias, se tiene:

$$P_{jq} = \int_{\varepsilon_{jq}=-\infty}^{\infty} \int_{\varepsilon_{1q}=-\infty}^{V_{jq}-V_{1q}+\varepsilon_{jq}} \dots \int_{\varepsilon_{1q}=-\infty}^{V_{jq}-V_{Nq}+\varepsilon_{jq}} f(\varepsilon_{1q}, \varepsilon_{2q}, \dots, \varepsilon_{Nq}) d_{\varepsilon_{1q}} \dots d_{\varepsilon_{Nq}} \quad 2.16$$

Nótese que la probabilidad de elección es una integral multidimensional sobre la distribución de la parte no observada de la función de utilidad. Es importante señalar que pueden obtenerse diferentes modelos dependiendo de los supuestos sobre la distribución de los  $\varepsilon$  (errores aleatorios). Así por ejemplo, si los errores distribuyen independiente e idénticos (IID) Gumbel con media cero y varianza  $\sigma^2$ , la probabilidad de elección está dada por:

$$P_{jq} = \frac{\exp(\lambda V_{jq})}{\sum_{A \in A_{(q)}} \exp(\lambda V_{jq})} \quad 2.17$$

La ecuación 2.17 corresponde al modelo Logit Simple o Multinomial (MNL), donde  $\lambda$  es un factor de escala relacionado con la varianza del término de error,  $\lambda = \frac{\pi}{\sqrt{6}\sigma}$ . El factor de escala generalmente no es calculable directamente, por lo que es necesario fijar este valor, el cual usualmente se asume  $\lambda = 1$ . Dada su matriz de covarianza, por definición el MNL no acepta correlación entre alternativas, heterocedasticidad ni variaciones en los gustos. Por otro lado, es común especificar la utilidad sistemática lineal en los parámetros, así:

$$V_{jq} = \theta X_{jq} \quad 2.18$$

Donde  $\theta$  es un vector de parámetros a estimar, y  $X_{jq}$  los atributos que describen la alternativa  $A_j$ . En la función de utilidad es posible especificar constantes específicas, que recogen el efecto agregado de las variables no consideradas. Cabe destacar que durante la modelación, una de las constantes debe fijarse en cero. La estimación del vector de los parámetros restantes requiere observaciones respecto de los atributos y de las elecciones de una muestra de  $Q$  individuos. Con la anterior información es posible construir la función de log-verosimilitud, dada por la siguiente expresión:

$$l(\theta) = \sum_{q=1}^Q \sum_{A_j \in A(q)} g_{iq} \ln(P_{iq}) \quad 2.19$$

Donde  $g_{ij}$  toma el valor uno si el individuo  $q$  escoge  $A_j$  y cero en otros casos. Maximizando la función es posible encontrar un conjunto de estimadores máximo verosímiles  $\theta^*$  que distribuyen asintóticamente  $N(\theta, S^2)$ , donde (Ortúzar y Willumsen, 2003):

$$S^2 = - \left[ E \left( \frac{\partial^2 l(\theta)}{\partial \theta^2} \right) \right]^{-1} \quad 2.20$$

La ecuación 2.17 aplica cuando las alternativas son excluyentes y se garantiza la ortogonalidad entre ellas. Cuando existe correlación entre alternativas, ha sido extendido el uso del logit jerárquico o logit anidado (Williams, 1977).

Una vez calibrado el modelo de elección discreta se revisan ciertos aspectos, como la significancia de los parámetros, lo cual se realiza obteniendo de la matriz de covarianza, los errores estándar de los parámetros estimados (ecuación 2.20). De este modo es posible verificar estadísticamente si el parámetro  $\theta_k$  es significativamente igual a un valor  $\bar{\theta}_k$  definiendo el estadístico  $t = \frac{(\theta_k - \bar{\theta}_k)}{s_k}$  que distribuye asintóticamente  $N(0,1)$ . Típicamente se evalúa la hipótesis nula considerando  $\theta_k = 0$  o  $\theta_k = \theta_R$ , donde  $\theta_R$  es el valor “verdadero” o de referencia del parámetro. El estadístico se prueba con la distribución Normal estándar al nivel de significación deseado (usualmente el 95%, por lo cual el valor crítico es  $t = 1,96$ ).

Para seleccionar el mejor modelo es común guiarse por el valor de la log verosimilitud pero también pueden compararse las bondades de ajuste de dos modelos, cuando uno es una versión restringida del otro a través del test de razón de log verosimilitud

$$LR = -2\{l(\theta^*_{,r}) - l(\theta^*)\} \quad 2.21$$

Donde  $l(\theta^*_{,r})$  y  $l(\theta^*)$  son las log-verosimilitudes en convergencia de los modelos restringido y no restringido, respectivamente. El estadístico distribuye asintóticamente  $\chi^2$  con  $r$  grados de libertad, en que  $r$  es el número de restricciones lineales.  $LR$  debe compararse con el valor crítico de  $\chi^2$  con  $r$  grados de libertad al nivel de significación deseado.

Para la distribución de viajes, se puede calibrar un modelo de elección de destino que permita estimar los viajes que se realizan desde cada zona  $i$  a cada destino  $j$ , teniendo en cuenta las  $k$  zonas que puede elegir el individuo. La función de utilidad asociada a cada alternativa de destino, deberá incluir las características que influyen en el usuario para viajar hacia un destino en específico.

Esta metodología es igualmente utilizada para desarrollar la subetapa de elección modal del modelo clásico, la cual consiste en establecer las variables que influyen en las decisiones particulares de elección del medio de transporte para realizar el viaje desde el origen al destino deseado, entre el conjunto de alternativas disponibles. Al establecer la elección de modo que haría cada usuario, bajo ciertas circunstancias específicas de viaje, se determina igualmente la importancia que le dan los usuarios a cada característica que definen las distintas alternativas (Ortúzar & Willumsen, 2011). Con esto se puede determinar los viajes en cada modo al momento de agregar las decisiones particulares y se conocen los elementos para incentivar o desincentivar un modo particular.

Para los escenarios futuros se deben proyectar los elementos que hacen parte de la función de costo y obtener los vectores de viaje obtenidos de los modelos de generación y atracción para los periodos definidos.

#### **2.1.4 Modelo de asignación**

La oferta de transporte se modela asignando flujos vehiculares a los distintos arcos que componen una red. Los usuarios eligen siempre aquellas rutas que le producen mayor beneficio ponderando características de las rutas disponibles.

En primer lugar para desarrollar el modelo, se establece una zonificación que cumpla criterios específicos, previamente delimitados; adicionalmente se definen un conjunto de arcos y nodos que conforman la red.

Los nodos deben representar los puertos de acceso y egreso, así como los puntos de transbordo según el modo en que haya tenido lugar el acceso o egreso del puerto (Sheffi, 1985). A cada arco se le define una función de costo representativa, con parámetros mínimos como: longitud, velocidad de recorrido, capacidad, tiempo de viaje en vehículo y (Ortúzar & Willumsen, 2011).

Así mismo se caracterizan los modos, especificando cuáles serán analizados, incluyendo la caminata y se definen sus atributos, que usualmente son: velocidad, intervalo, tiempo de transferencia, tarifa de ruta y de transferencia, ponderadores para el tiempo de espera y de transferencia (máximos y mínimos) y máximo tiempo de viaje total.

Una vez definidos los parámetros de la red y de las rutas disponibles, se realiza la asignación de los viajes a los distintos arcos. Para realizar la asignación existen varias metodologías, entre las cuales es usual el uso de procesos iterativos que calibren las condiciones del sistema dentro de los parámetros que influyen en la elección de ruta.

#### **El problema de rutas mínimas**

Sea  $ij$  los nodos entre los cuales se realizan los viajes a asignar,  $R_r$  las líneas que pasan por  $ij$  y sea  $V_{ij}$  el flujo entre  $ij$ . Para resolver el problema de asignación se deberá establecer el

conjunto de líneas atractivas,  $r \in R_r$ , siendo una línea atractiva aquella que minimiza el tiempo de viaje (o función de costo según sea el caso) (Chiriqui, 1974). Luego se establece el siguiente problema de optimización, con sus respectivas restricciones:

$$\min_{\{x_r\}} \frac{k + \sum_{r=1}^n t_r f_r x_r}{\sum_{r=1}^n f_r x_r} \quad 2.22$$

s.a. :  $x_r = 0,1 \forall r \in R_r$

Donde:

$k$  : Constante que depende de la distribución adoptada para las frecuencias de las líneas.

Una vez definido todo esto, el problema de rutas mínimas (shortest path) queda formulado como sigue (Florian & Spiess, 1983; De Cea & Fernández, 1989):

Sea:

$\bar{w}$  : Conjunto de pares de nodos conectados por al menos una sección de línea

$S_{ij}$  : Conjunto de secciones de líneas que conectan directamente i con j

$L_i^+$  : Conjunto de secciones de líneas que salen del nodo i

$L_i^-$  : Conjunto de secciones de líneas que entran al nodo i

$V_r$  : Flujo sobre la sección de línea r

$T_r$  : Tiempo de viaje en vehículo sobre la sección de línea r

$f_r$  : Frecuencia asociada a la sección de línea r

$V_{ij}$  : Flujo sobre la sección de ruta (i,j) que es la suma de flujos de todas las secciones de líneas pertenecientes al conjunto  $S_{ij}$ .

$$\min_{\{V_r, w_{ij}\}} \left\{ \sum_{r \in R_r} V_r T_r + k \sum_{(i,j) \in \bar{w}} w_{ij} \right\} \quad 2.23$$

$$w_{ij} = \frac{V_{ij}}{\sum_{r \in S_{ij}} f_r x_r} \quad 2.24$$

s.a. :

$$\sum_{r \in L_i^+} V_r + g_i = \sum_{r \in L_i^-} V_r \forall i \in N \quad 2.25$$

$$V_r \leq f_r w_{ij} \forall (i, j) \in \bar{w}, r \in S_{ij} \quad 2.26$$

$$V_r \geq 0 \quad \forall r \in R_r \quad 2.27$$

Donde al primer término de la función objetivo se identifica como tiempo total de viaje en vehículo para todos los viajeros de  $ij$ . El segundo término es el tiempo total de espera, corresponde al problema de optimización hiperbólica de elección de líneas atractivas. En vista de esto se han formulado diferentes metodologías para abordar el procedimiento de solución. El más común es usar el algoritmo de Chiriqui para resolver el problema de optimización hiperbólica (Chiriqui, 1974), y aplicar luego el algoritmo Dijkstra (1959) para resolver el problema lineal de rutas mínimas.

### Asignación estocástica

La asignación, para la elección de una ruta desde un origen a un destino se realiza dependiendo del atractivo general el cual es función de los elementos del viaje tales como tiempo, tarifas, etc.

El método de asignación estocástica por equilibrio de usuario (SUE, de sus siglas en inglés) es un método iterativo que empieza con la búsqueda de la ruta más corta desde el origen al destino (Sheffi, 1985), alterando sus componentes aleatoriamente con los términos de error, dependiendo si la distribución es normal, Logit o de distribución uniforme.

Los usuarios seleccionan una alternativa basándose en sus componentes como tiempo de viaje, tarifas o penalidades por transferencia. El modelo asigna los flujos a las rutas más atractivas y luego se realiza un ajuste del costo generalizado y se genera una nueva iteración dando como resultado flujos distintos.

La asignación estocástica por equilibrio de usuario asume que los usuarios no tienen información completa de los atributos de la red y perciben el costo de distinta manera. En teoría, en el equilibrio estocástico de usuario, ningún viajero puede cambiar su utilidad esperada por el cambio de rutas. El resultado es que las rutas reciben flujo en función de su atractividad relativa. Cuando el término error proviene de la distribución normal, los flujos son similares al modelo Probit de elección de ruta.

A continuación se muestra la función de costo calibrado para el método de asignación estocástica utilizada por el programa *TRANSCAD*, desarrollado por *Caliper*®.

$$c_k = \sum_{i \in L} \left[ \gamma_f f_i + VOT(\gamma_w w_i + \gamma_x x_i) \right] + \sum_{i \in I} \left\{ VOT \left[ \gamma_d d_i + \gamma_v t_i \left( 1 + \alpha_i \left( \frac{v_i}{C_i} \right)^{\beta_i} \right) \right] \right\} + \sum_{j \in J} [VOT(\gamma_k k_j)] \quad 2.28$$

l: Conjunto de líneas de transporte público usada en la ruta k

i: Índice de una sección de línea usada por la ruta k



- I: Conjunto de secciones de línea usadas por la ruta k  
j: Índice de un arco que no es de transporte público usados por la ruta k  
J: Conjunto de arcos que no son de transporte público usados por la ruta k  
 $C_k$ : Costo total de la ruta k, en unidades monetarias  
VOT: valor del tiempo, en unidades monetarias por unidad de tiempo  
 $f_l$ : Tarifa para la línea l  
 $w_l$ : Tiempo de espera para la línea l  
 $x_l$ : Tiempo de penalidad por transferencia para la línea l  
 $\gamma_f$ : Ponderador de la tarifa  
 $\gamma_w$ : Ponderador del tiempo de espera  
 $\gamma_x$ : Ponderador del tiempo de penalidad por transferencia  
 $d_i$ : Tiempo de permanencia en el paradero asociado a la sección de línea i  
 $v_i$ : Volumen de pasajeros en la sección de línea i  
 $C_i$ : Capacidad de la sección de línea i  
 $t_i$ : Tiempo de viaje en el vehículo asociado a la sección de línea i  
 $\alpha_i$ : Parámetro Alfa en la curva del Bureau of Public Rodas (BPR) para la sección de línea i  
 $\beta_i$ : Parámetro Beta en la curva BPR para la sección de línea i  
 $\gamma_d$ : Ponderador del tiempo de permanencia en el paradero  
 $\gamma_v$ : Ponderador del tiempo de viaje en el vehículo  
 $k_j$ : Tiempo en un arco de acceso o egreso para el arco que de acceso o egreso j  
 $\gamma_k$ : Ponderador para el tiempo en un arco de acceso o egreso

El tiempo de espera es calculado en cada parada donde el abordaje inicial o una transferencia ocurra y está dado por:

$$w = \alpha \cdot h \quad 2.29$$

Dónde:

- h : intervalo de tiempo entre vehículos  
w : tiempo de espera  
 $\alpha$  : Parámetro de entre llegada

Las variables  $t_i$ ,  $w_i$  y todos los ponderadores  $\gamma$  son aleatorias, y siguen una distribución de probabilidad con una varianza que deben ser especificadas, de esta forma estas variables tienen la siguiente forma:

$$\theta = F(\mu = \bar{\theta}, \sigma) \quad 2.30$$

### **Calibración**

Para la calibración del modelo de asignación es necesario especificar algunos parámetros básicos, que describen aspectos de la red, de los modos y sus rutas.

En primer lugar cada arco de la red debe poseer la velocidad de operación del transporte público y caminata; así mismo, el tiempo de viaje que toma recorrerlo. Segundo se debe especificar cuál es el modo de caminata y realizar una selección de aquellos arcos en que se permite el uso de este. Adicionalmente se debe definir los nodos que operara como paraderos, tanto para las rutas fluviales como carreteras

Para la descripción de las características de los modos, se construye una tabla en que se determinan los distintos modos que serán analizados, incluyendo el de caminata. A cada uno de estos se le definen ciertos parámetros que sean representativos de las líneas que lo conforman, entre estos están: velocidad, intervalo, tiempo de transferencia, tarifa de ruta y de transferencia, ponderadores para los tiempos, tiempos de espera y de transferencia (máximos y mínimos) y máximo tiempo de viaje total

Estos parámetros también van en la tabla de rutas, en la cual se debe definir cada uno de ellos, para cada servicio. Adicionalmente se especifica la capacidad que tiene en el periodo completo de análisis. Se puede definir de cuál de las dos tablas se debe tomar los parámetros en el momento de la asignación. Si se proporcionan en ambas, el programa tomara la información de la tabla de rutas y en caso que falte algún dato se remitirá a la tabla de modos.

Adicional a los ponderadores que se encuentran en los tablas de modos y rutas se realiza una tabla de transferencia donde se especifican penalidades por cambiar de modo.

## **2.2 Modelos de demanda directa**

Como alternativa a la modelación clásica, existen varios ajustes matemáticos que permiten dar una visión generalizada de la demanda. Una buena alternativa es desarrollar un enfoque que incorpore todos los niveles de la modelación secuencial, lo cual puede reducir significativamente los errores que se van acumulando en cuanto se avanza en los diferentes niveles del modelo de planificación (Ortuzar y Willumsen, 2011).

Los modelos de demanda directa relacionan un volumen de pasajeros entre cada par de zonas con ciertas características que afectan la demanda. La estructura de la ecuación es multiplicativa, y asocia variables socioeconómicas y del viaje realizado. La práctica usual

en la literatura es implementar el tamaño de la población de la zona de origen y de destino, así como las características básica del viaje modelado entre el par de zonas en los modelos. En términos generales se incluye el costo de la tarifa de viaje y el tiempo asociado a este, ya que corresponden a variables intrínsecas de la actividad que se está realizando. No obstante se puede implementar una función de costo generalizado que permita evaluar el costo de viaje como un total (Wardman et al., 2007), tal como se indica en (2.31)

$$V_{ij} = \phi(P_i P_j)^{\theta_1} \cdot (f_{(GC)})^{\theta_2} \cdot \prod_k \beta^{\theta_k} \quad 2.31$$

Donde  $f_{(GC)}$  es la función de costo generalizado,  $\beta$  son las variables explicativas adicionales que complementarán el modelo, y  $\phi$  y  $\theta_k$  los parámetros a calibrar.

La función de costo puede adaptarse a unidades monetarias, involucrando el concepto de costo generalizado de viaje, al considerar el producto del tiempo de viaje ( $T_v$ ) con el valor del tiempo ( $\theta_{tc}$ ), obtenido en el modelo de partición modal, y el costo de la tarifa de viaje ( $C_v$ ) como se puede ver en la ecuación 2.32:

$$f_{(GC)} = C_v + \theta_{tc} \cdot T_v \quad 2.32$$

### **3 RECOLECCIÓN Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN**

En Colombia el transporte de pasajeros en el modo fluvial mantiene su importancia en gran parte del país. A través del río Magdalena se movilizan más de un millón de pasajeros cada año. En los municipios ribereños principales existe un cierto nivel de organización y se cuenta con infraestructura portuaria, lo que permite a estos municipios consolidarse como terminales de pasajeros. No obstante, es práctica usual recoger y dejar pasajeros, según conveniencia de los usuarios, en diversos puntos sobre la ribera. A pesar de la existencia de estos puntos informales de parada, como nodos de la red de transporte fluvial sobre el río Magdalena se definieron paraderos principales (puertos formales) para simplificar la modelación y se asignaron a ellos los viajes cercano.

#### **3.1 Vehículos**

En el río Magdalena se presta el servicio de transporte fluvial en dos equipos: chalupas, que son embarcaciones con capacidad entre 20 y 30 pasajeros, propulsadas por motores fuera de borda, adecuadas con sillas o bancos para acomodar a los pasajeros, con techos de lona o de fibra de vidrio; y motocanoas, que son equipos con motores fuera de borda, fabricados principalmente en madera y con capacidad entre 30 y 40 pasajeros. Las motocanoas no brindan elementos de seguridad o comodidad a los pasajeros y es usual que se transporte simultáneamente pasajeros y carga sobre ellos.

Además, en el puerto de Magangué y de Gamarra se tiene un ferry que es utilizado para cruzar el río. Igualmente, es frecuente que además de pasajeros, también transporte carga. No obstante, para fines de análisis sólo se consideró el transporte de personas.

#### **3.2 Zona de estudio**

La modelación se realizó sobre el río Magdalena, desde el Puerto de Calamar (Departamento de Bolívar) hasta Puerto Boyacá (Departamento de Boyacá). Para fines de modelación se definieron 7 puertos principales, desde los cuales se captan la mayor parte de los viajes. Los puertos evaluados son: Calamar (Bolívar), Magangué (Bolívar), El Banco (Magdalena), Gamarra (Cesar), Barrancabermeja (Santander), Puerto Berrío (Antioquia) y Puerto Boyacá (Boyacá). Estos puertos, en conjunto, representan cerca del 90% del total de los viajes que se realizan sobre el río.

Debe aclararse, que inicialmente se consideró Puerto Salgar en lugar de Puerto Boyacá, debido que allí se encuentra la inspección fluvial, pero en realidad las empresas inscritas en esta, operan en Puerto Boyacá, donde finalmente se realizó la toma de datos.

A cada uno de estos puntos se les asignó un código que los identifica, tal como se muestra en la Tabla 3.1. A su vez, la Figura 3.1 muestra el esquema de la cuenca del Magdalena,

destacando los puertos escogidos para la recolección de datos.

Figura 3.1 Zona de estudio



Fuente: Estudio del Sistema Integrado de Transporte SIT Caribe, Tomo I, Capítulo 3.

Tabla 3.1 Puertos de Aforo

Puerto	Código
Calamar	1
Magangué	2
El Banco	3
Gamarra	4
Barrancabermeja	5
Puerto Boyacá	6
Puerto Berrío	7

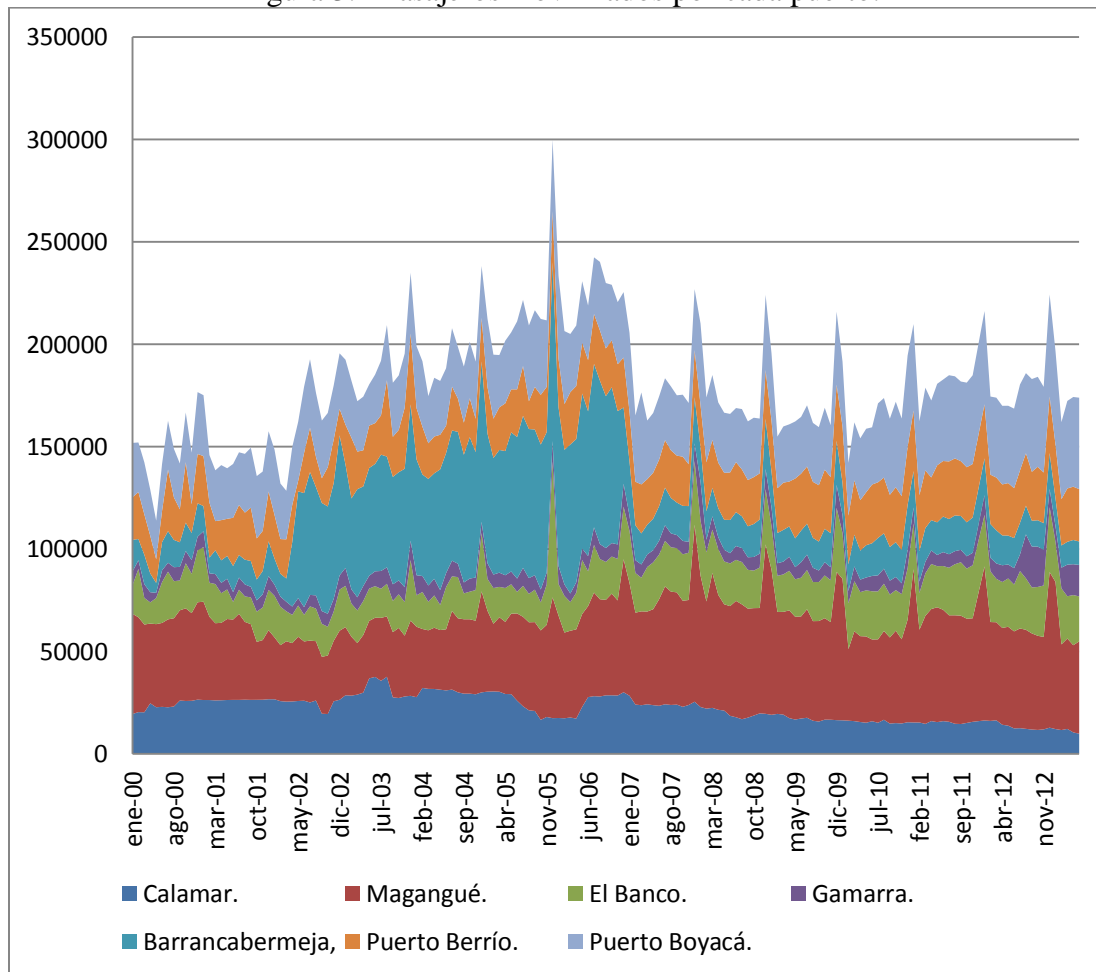
Fuente: Elaboración propia

### 3.3 Caracterización de la movilidad en el río Magdalena

Las inspecciones fluviales de cada puerto en Colombia ejercen control de las empresas prestadoras de servicio de transporte, tanto de pasajeros como de carga. Las inspecciones reportan el total de carga según su tipo cada mes, al igual que especifican el total de pasajeros que entran y salen del puerto.

Si bien esta información no permite conocer el origen y el destino real de los usuarios del servicio, permite dimensionar el servicio de transporte y conocer su evolución en el tiempo.

Figura 3.2 Pasajeros movilizados por cada puerto.



Fuente: Elaboración propia, con base en los registros de pasajeros del Ministerio de Transporte.

En la Figura 3.2 se muestra el total de pasajeros movilizado, mes a mes, desde enero del año 2000 hasta mayo de 2013. Se puede apreciar que desde inicios del año 2002 hasta finales del 2006 el puerto de Barrancabermeja movilizó una mayor cantidad de pasajeros en comparación con los demás puertos. Exceptuando este periodo, el puerto de Magangué moviliza la mayor cantidad de pasajeros.

De manera adicional se pudo apreciar cierta estacionalidad en los viajes que se realizan en los distintos puertos. En términos generales es usual que el mayor número de viajes se registre entre el diciembre y enero, exceptuando en el puerto de Calamar y de Puerto Berrío, que tienen un comportamiento más uniforme.

### 3.3.1 Modelos series de tiempo para el número de pasajeros que entran y salen por puerto.

Con el propósito de conocer el comportamiento del servicio de transporte fluvial, en los últimos años e igualmente establecer si existe alguna tendencia en el transporte fluvial, se realizaron ajustes de serie de tiempo, a partir de los registros mensuales del número pasajeros que embarcan y desembarcan en cada puerto. Los datos corresponden al periodo entre enero del año 2000 hasta mayo de 2013, reportados por las empresas prestadoras de servicio a las inspecciones fluviales y recolectadas por el Ministerio de Transporte.

En la Tabla 3.2 se muestra el modelo que presentó el mejor ajuste para cada caso analizado, considerando los siguientes tipos de modelos: modelos de media constante, tendencia lineal y modelos ARIMA.

El modelo de media constante toma el valor medio de los datos usados en el modelo estadístico. Generalmente se aplica en casos donde no se percibe cambios sustantivos de la variable en el tiempo, sino que los valores oscilan en un rango relativamente constante.

El modelo de tendencia lineal ajusta los datos a una línea recta en función del tiempo, sugiriendo un crecimiento constante de la variable con el tiempo.

Los modelos ARIMA (Autorregresivos Integrados de Media Móvil), como su nombre lo indica, integra los modelos autorregresivos, donde la variable dependiente es explicada por las observaciones de ella misma en periodos de tiempo  $t$  más un término de error y los modelos de media móvil donde el valor de la variable endógena está en función de un término independiente y una sucesión de errores correspondientes a periodos precedentes (Box et al, 2005).

Tabla 3.2. Modelos de ajuste para la serie historica

	Modelo que mejor ajusta entrada	Modelo que mejor ajusta salida
Calamar	ARIMA (1,0,0)	ARIMA (1,0,0)
Magangué	ARIMA(1,1,2)	ARIMA(1,1,2)
El Banco	ARIMA(2,1,1)	ARIMA(2,1,2)
Gamarra	ARIMA(2,1,2)	ARIMA(2,1,1)
Barrancabermeja	ARIMA(2,0,1)	ARIMA (2,0,1)
Puerto Berrío	ARIMA(2,1,1)	ARIMA(1,1,2)
Puerto Boyacá	ARIMA(1,1,1)	ARIMA(1,1,1)

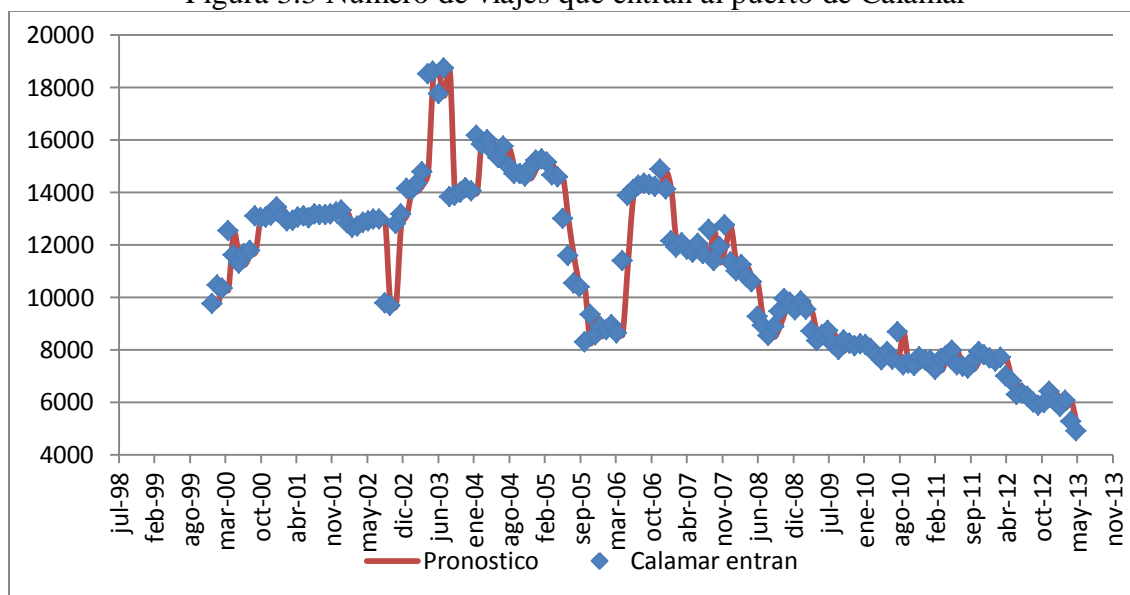
Fuente: Elaboración propia

#### Calamar

En la Figura 3.3 se muestra el número de pasajeros que entran mensualmente al puerto de Calamar, con el resultado del modelo ARIMA (1,0,0), el cual presenta el mejor ajuste para

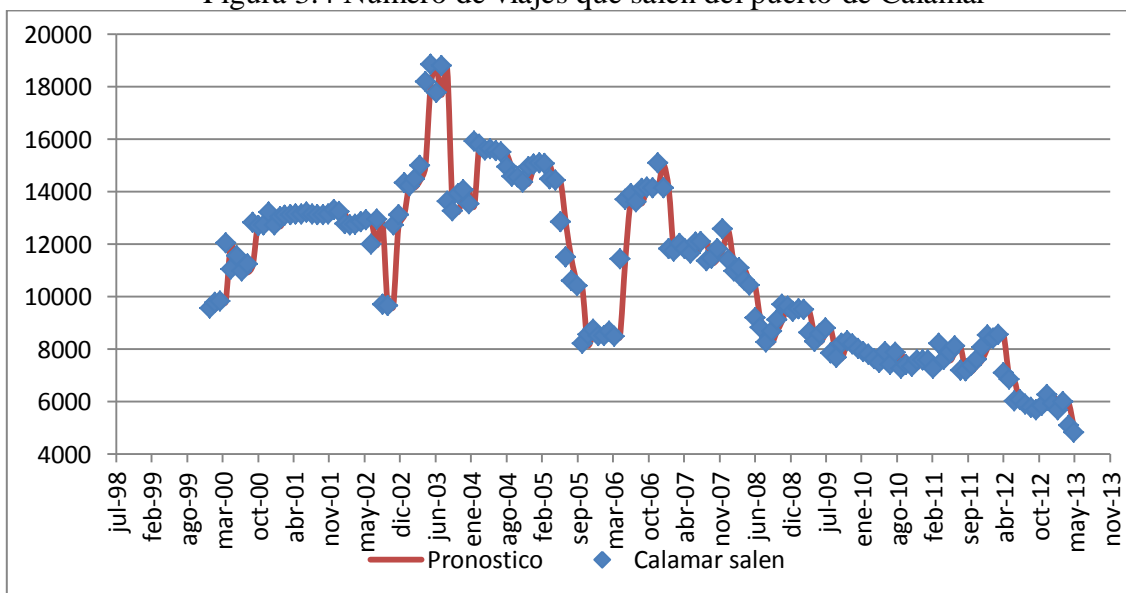
esta serie de datos, teniendo el menor error cuadrático medio. Así mismo en la Figura 3.4 se muestra los datos de volumen de pasajeros que salen del puerto de Calamar, con la línea de ajuste de un modelo ARIMA(1,0,0). Como se puede observar de los datos y del ajuste obtenido, en general los viajes realizados en el municipio de Calamar están decreciendo y no presentan una tendencia clara respecto al tiempo transcurrido.

Figura 3.3 Número de viajes que entran al puerto de Calamar



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.4 Número de viajes que salen del puerto de Calamar



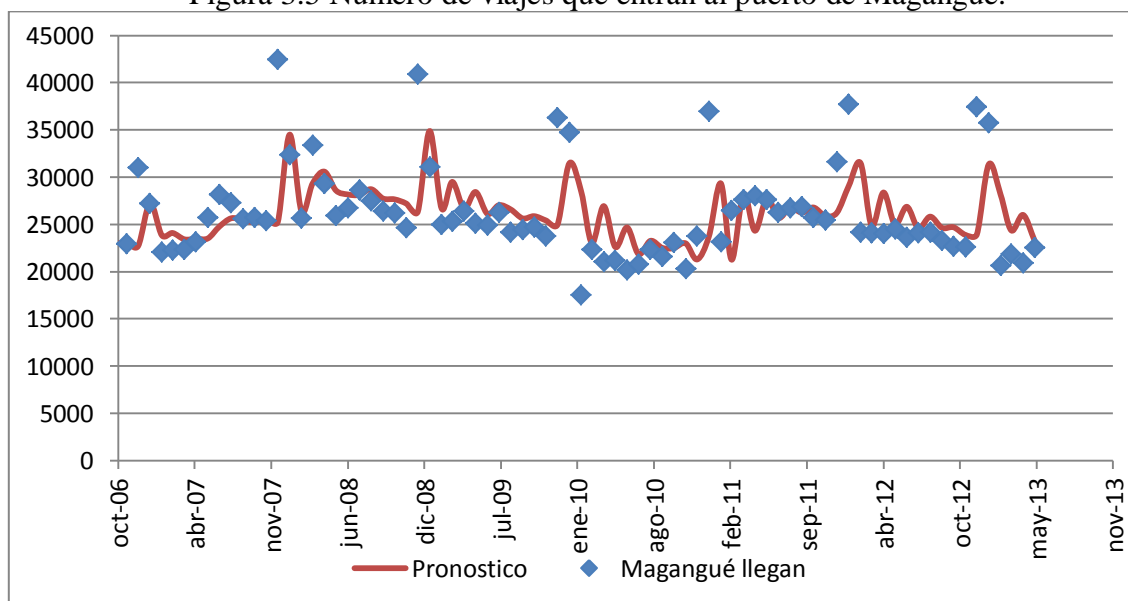
Fuente: Elaboración propia



## Magangué

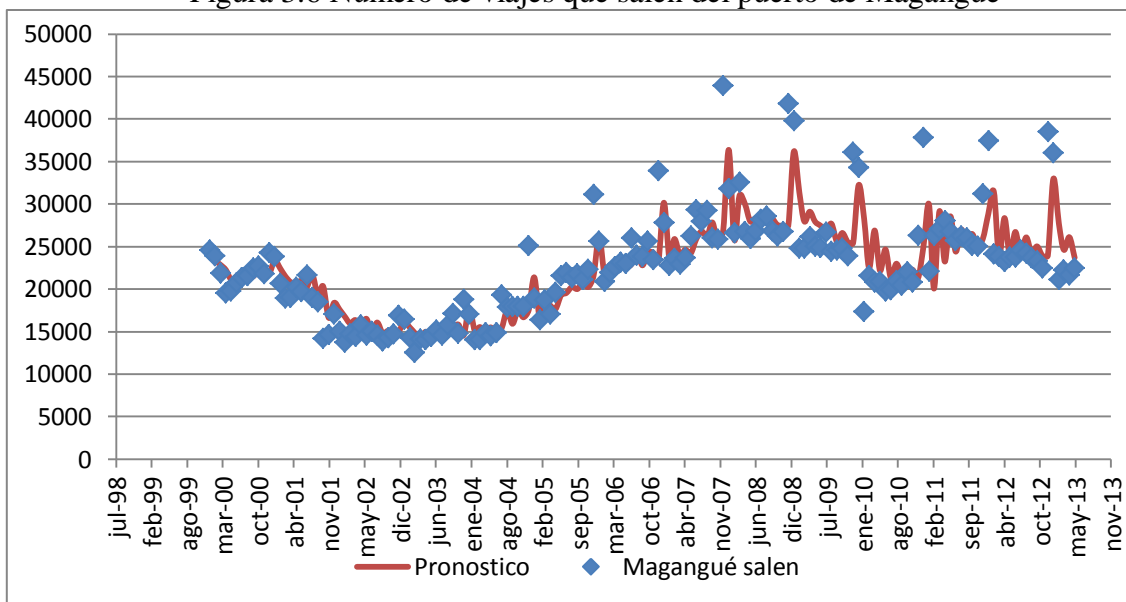
El número de pasajeros que entra al puerto de Magangué se ajusta a un modelo ARIMA(1,1,2), al igual que el número de pasajeros que salen, como se muestra en la Figura 3.5 y en la Figura 3.6 respectivamente. El comportamiento tanto de entrada como de salida de pasajeros del puerto es simétrico y se percibe un incremento de los pasajeros transportados en los meses de diciembre y enero, respecto a los demás meses del año, presentando una tendencia cíclica.

Figura 3.5 Número de viajes que entran al puerto de Magangué.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.6 Número de viajes que salen del puerto de Magangué



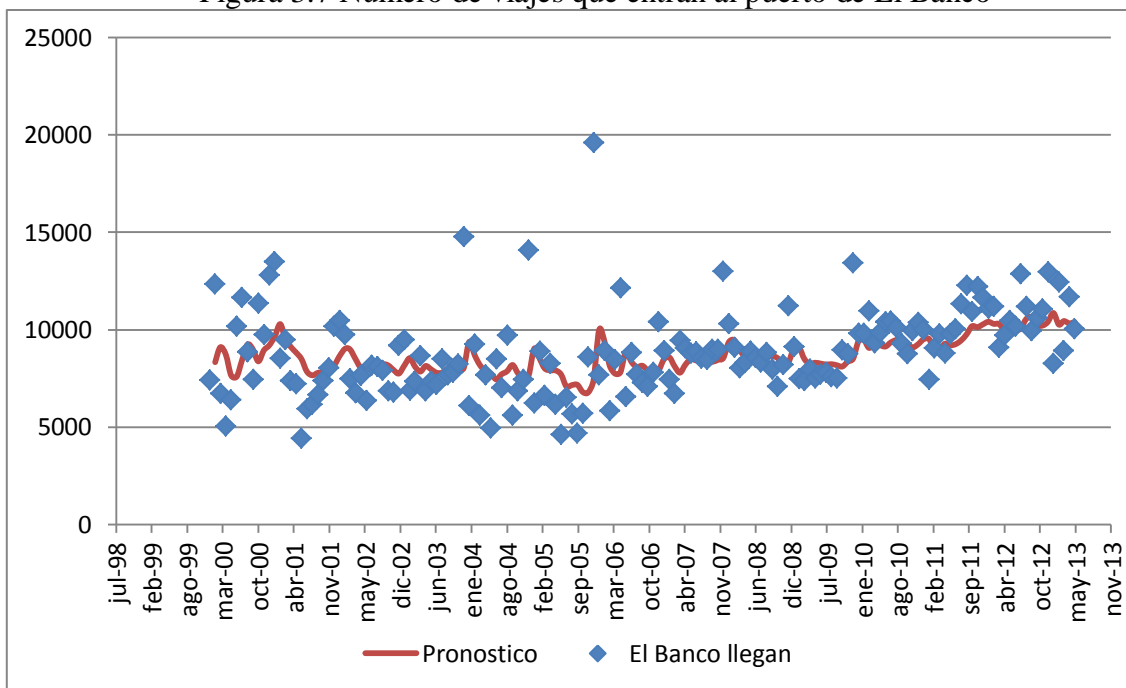
Fuente: Elaboración propia

### El Banco

El número de pasajeros que entran al puerto de El Banco, se ajusta de mejor manera a un modelo ARIMA (2,1,1), mientras los que salen tienen un comportamiento más afín a la serie ARIMA (2,1,2) (ver Figura 3.7 y Figura 3.8)

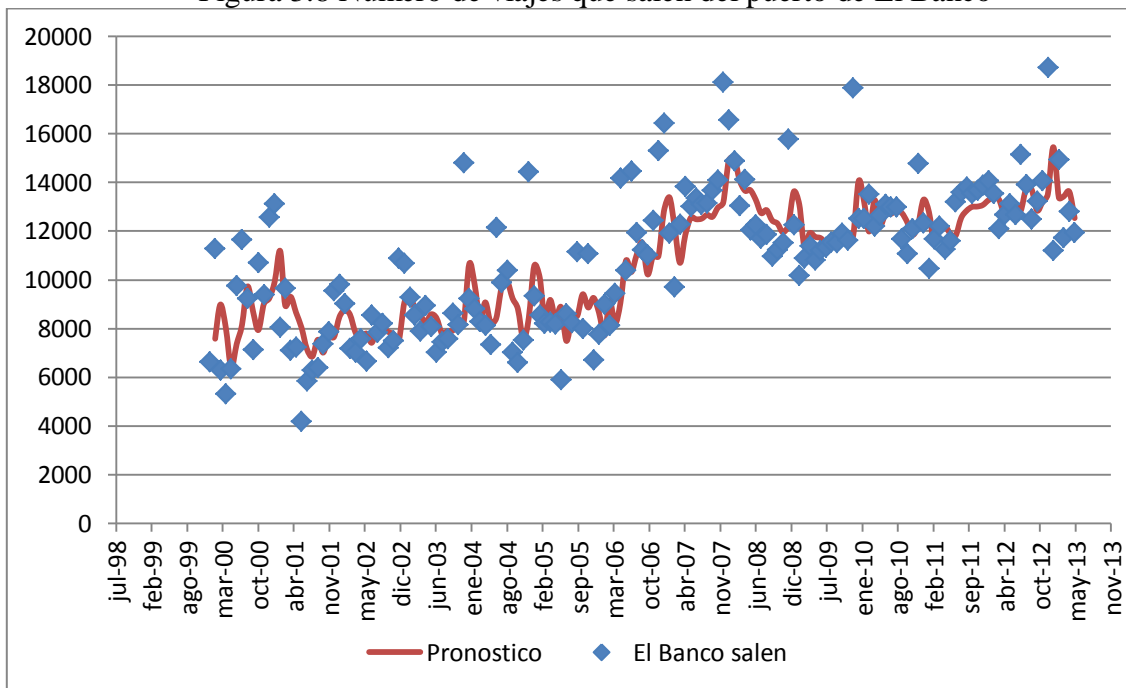
Aunque en términos generales se realizan mayor número de viajes en los meses de diciembre y enero, no se presenta una tendencia clara entre los datos, en especial a partir del año 2011.

Figura 3.7 Número de viajes que entran al puerto de El Banco



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.8 Número de viajes que salen del puerto de El Banco



Fuente: Elaboración propia

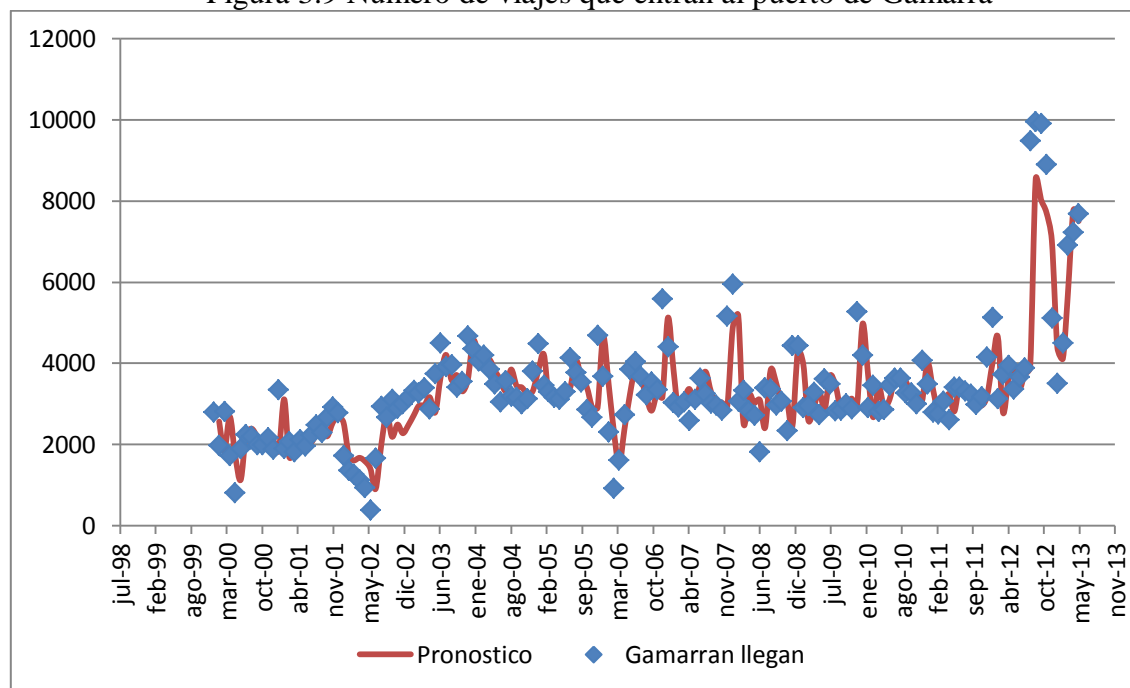
## Gamarra

En la Figura 3.9 se muestra el número de pasajeros que entran al puerto de Gamarra mensualmente en el periodo comprendido entre el enero del año 2000 y mayo de 2013. Con ajuste de un modelo de serie de tiempo ARIMA(2,1,2).

En la Figura 3.10 se presenta el ajuste del modelo ARIMA(2,1,1) para el volumen mensual de pasajero que sale del puerto de Gamarra.

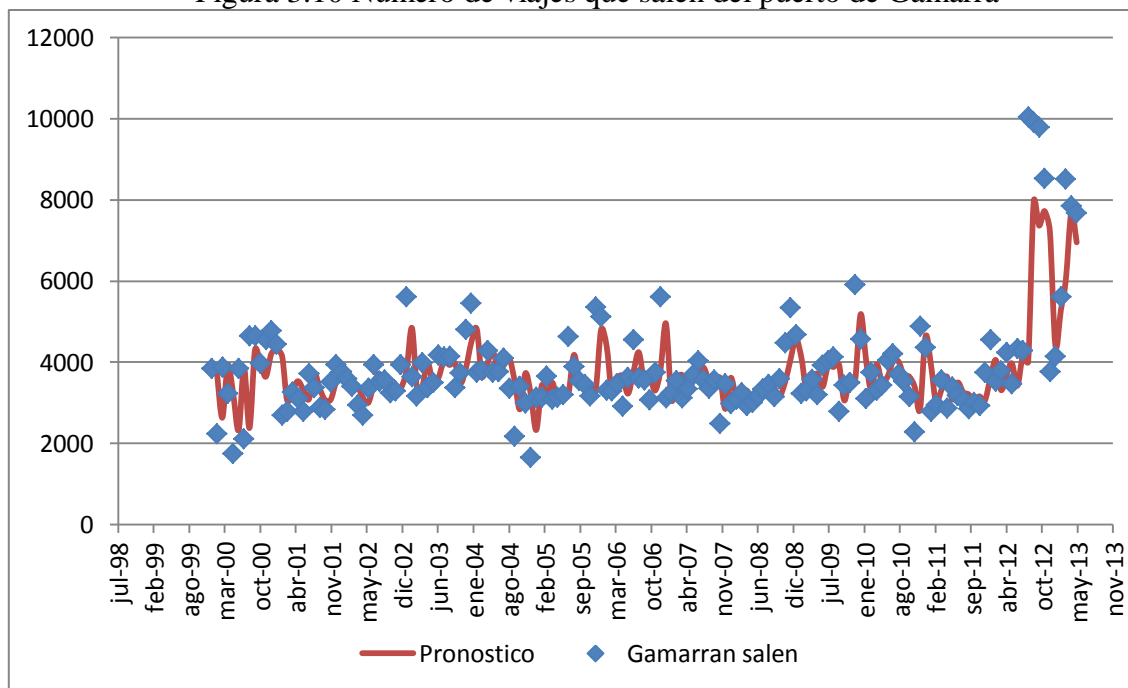
Entre los datos se puede percibir una tendencia cíclica del volumen de pasajeros, ya que el número de pasajeros movilizados en los meses de diciembre y enero son considerablemente mayor, que en el resto del año, no obstante esta tendencia se vio invertida en diciembre 2012 y enero de 2013, donde se registraron menos pasajeros que en los meses anteriores y posteriores.

Figura 3.9 Número de viajes que entran al puerto de Gamarra



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.10 Número de viajes que salen del puerto de Gamarra

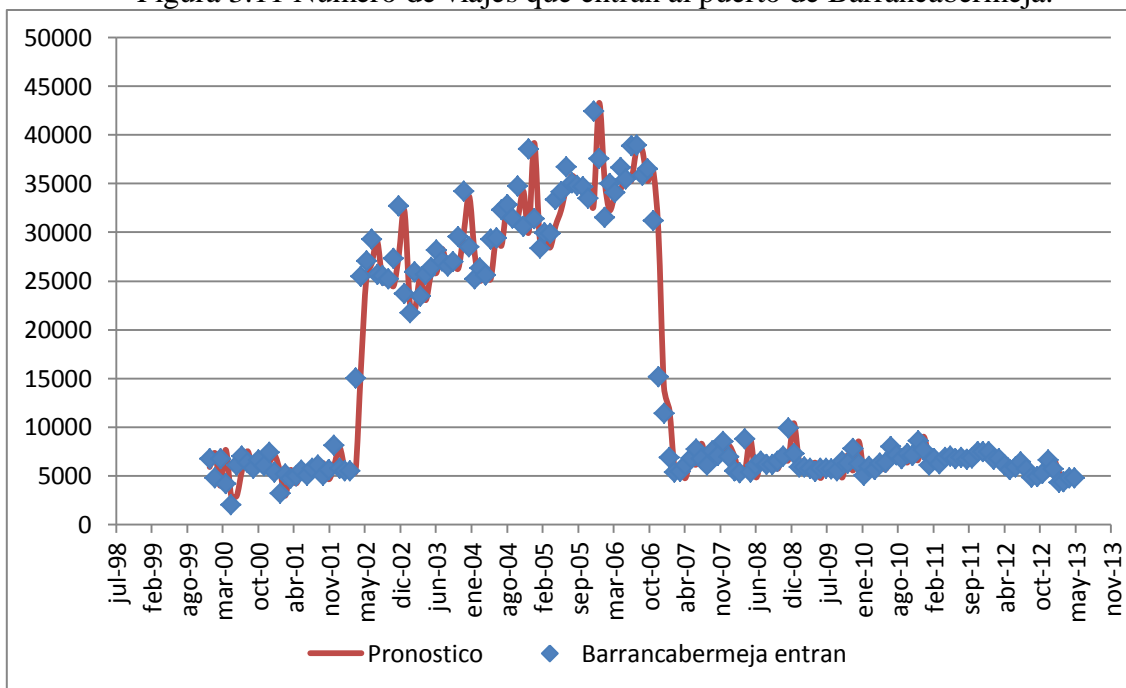


Fuente: Elaboración propia

## Barrancabermeja

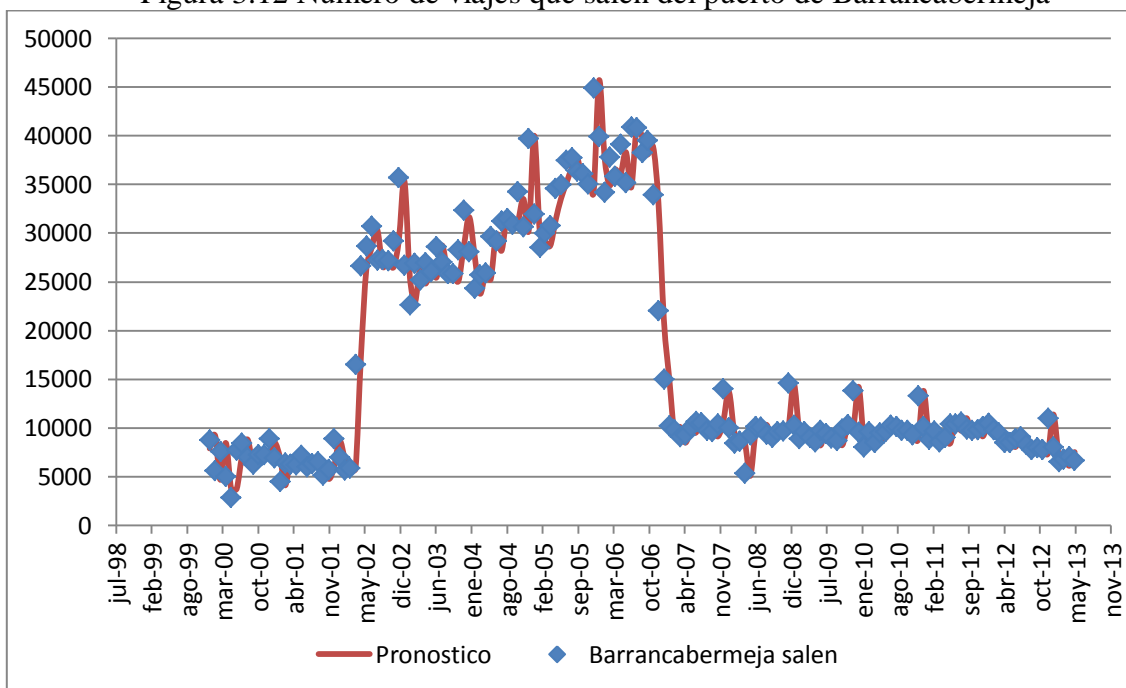
El número de pasajeros que entra al puerto de Barrancabermeja se muestra en la Figura 3.11 con el ajuste de un modelo de serie de tiempo ARIMA (2,0,1). Igualmente, el número de pasajeros que salen del puerto tienen un comportamiento con el mismo ajuste como se puede ver en la Figura 3.12. Puede notarse que entre los años 2002 y 2006 hubo un incremento en la demanda y que luego retornó a niveles históricos. Otro aspecto notable es que al finalizar e iniciar cada año se incrementa el número de pasajeros transportados mientras que en el resto del año se mantiene con niveles similares, a partir del 2011 esta tendencia se ha visto reducida, manteniendo mes a mes volúmenes similares de pasajeros.

Figura 3.11 Número de viajes que entran al puerto de Barrancabermeja.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.12 Número de viajes que salen del puerto de Barrancabermeja

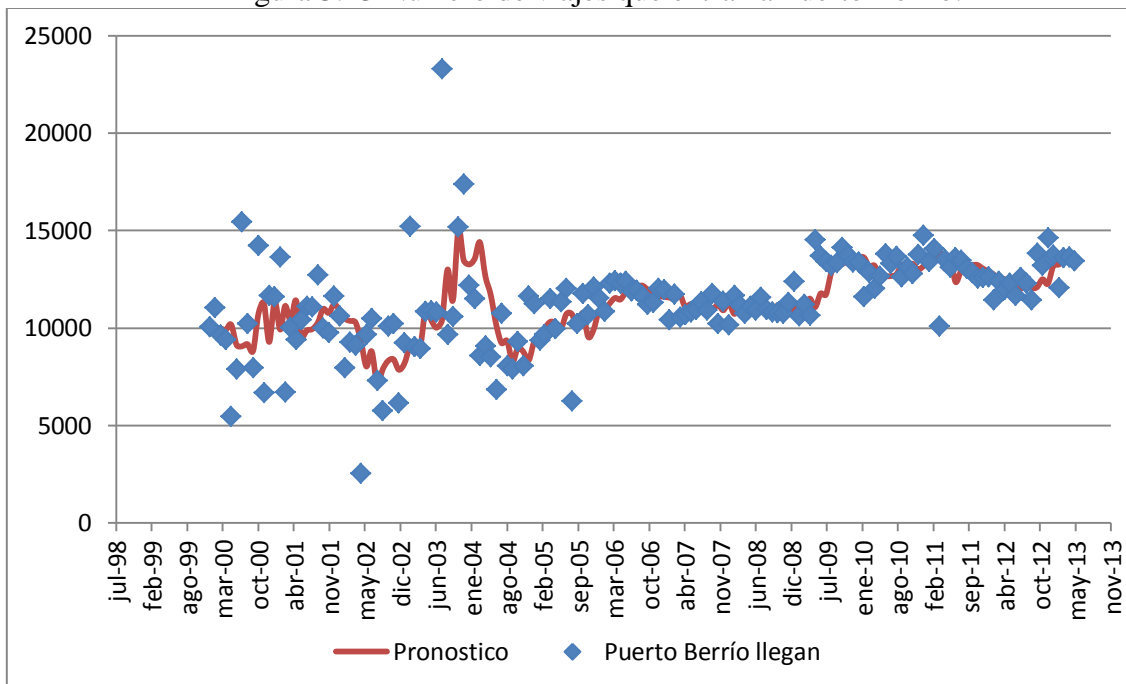


Fuente: Elaboración propia

## Puerto Berrío

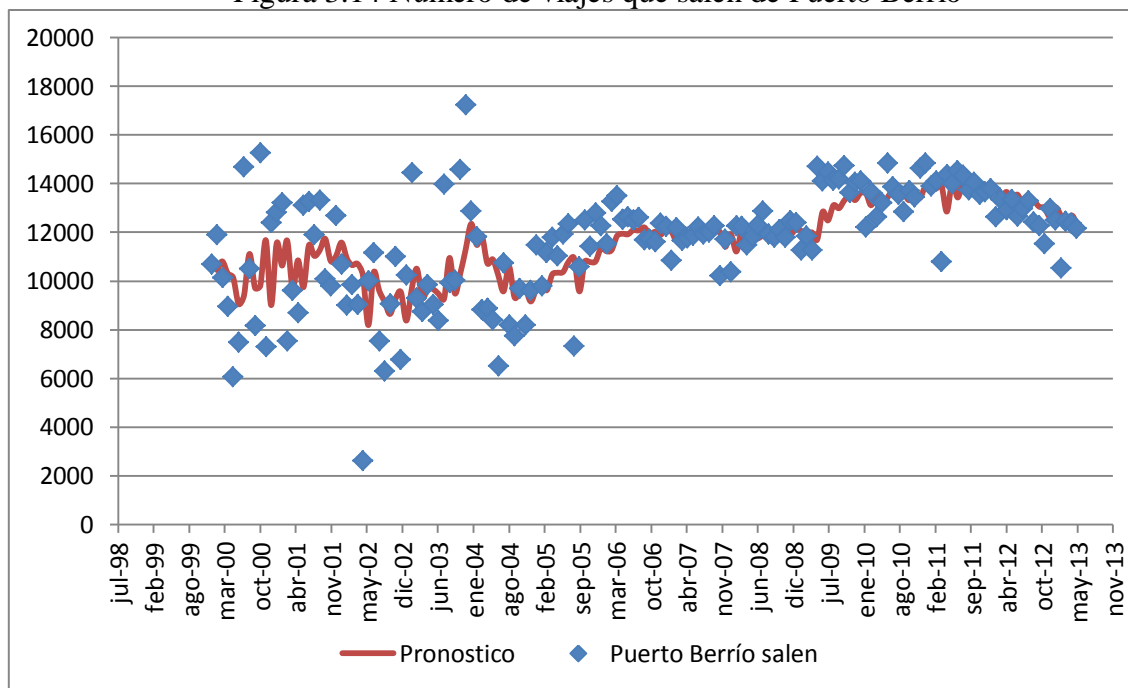
A continuación se presentan los volúmenes de pasajeros que entran (Figura 3.13) y que salen (Figura 3.14) de Puerto Berrío con sus respectivos modelos de ajuste; el cual para los pasajeros que entran es un modelo de ARIMA (2, 1, 1). Por su parte las viajes que salen de este puerto se ajustan al modelo ARIMA (1,1, 2).

Figura 3.13 Número de viajes que entran a Puerto Berrío.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.14 Número de viajes que salen de Puerto Berrío



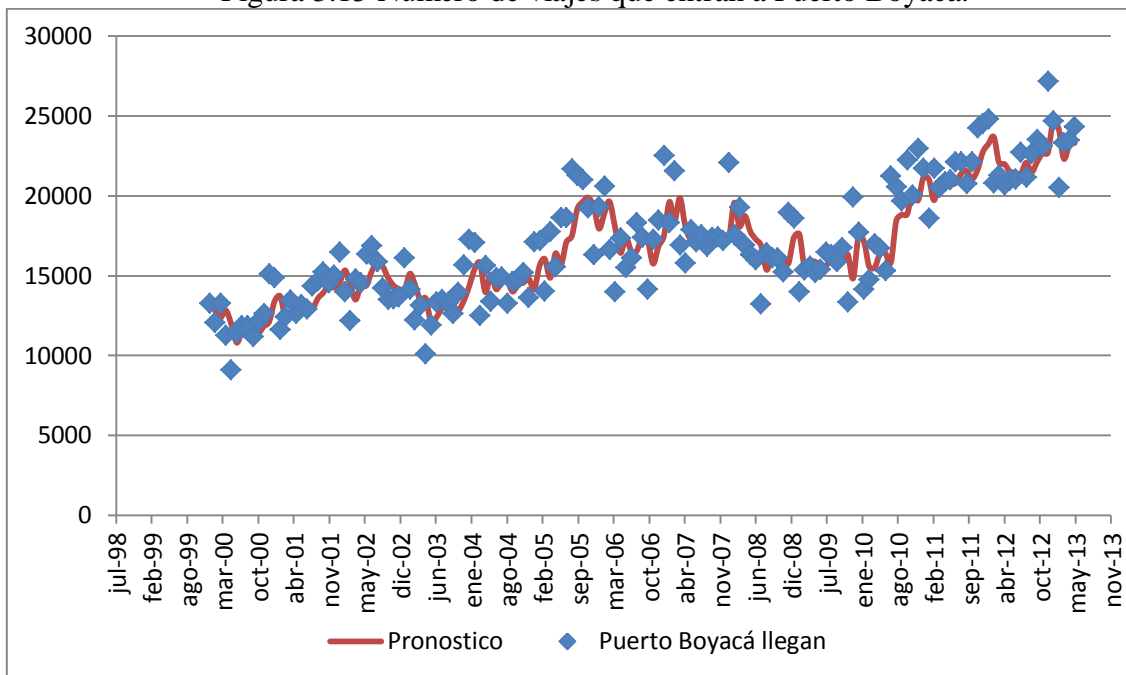
Fuente: Elaboración propia

### Puerto Boyacá

Para Puerto Boyacá el número de viajes en el tiempo presenta un ligero crecimiento, los volúmenes mensuales de pasajeros que entran al puerto se ajustan a un modelo  $ARIMA(1,1,1)$ , al igual que el número de vehículos que salen (ver Figura 3.15 y Figura 3.16). En este puerto es usual que el mayor número de viajes se realicen en los meses de diciembre y enero, no obstante la tendencia no es constante.

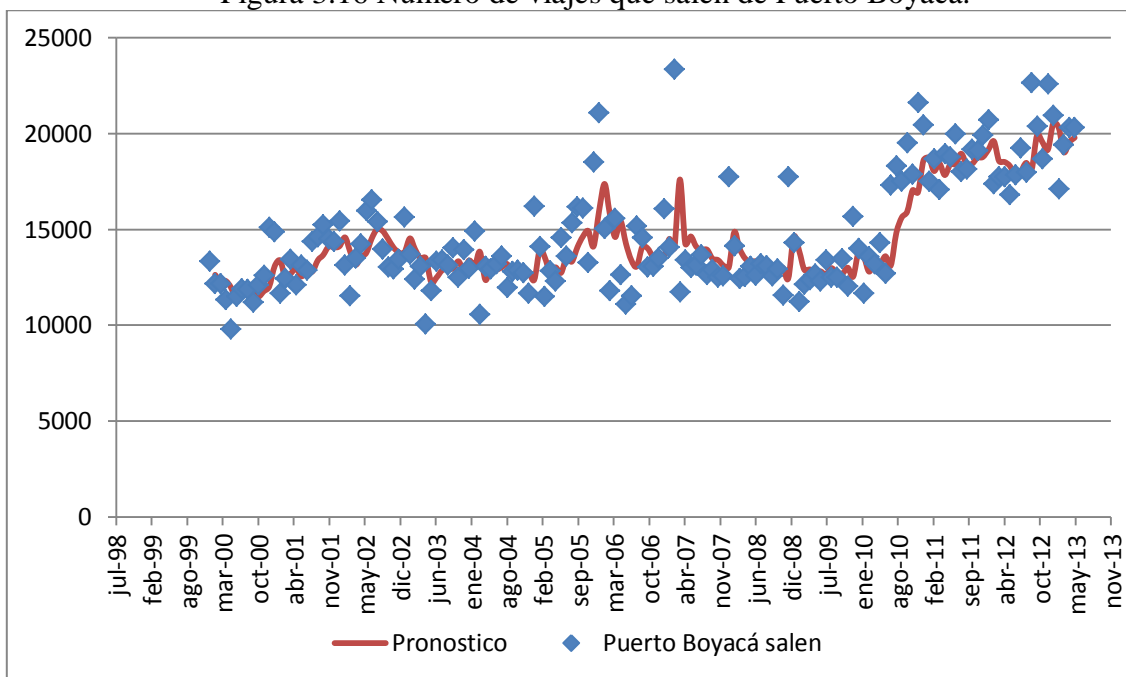


Figura 3.15 Número de viajes que entran a Puerto Boyacá.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.16 Número de viajes que salen de Puerto Boyacá.



Fuente: Elaboración propia



pasajero, involucrando datos como origen y destino del usuario y la cadena de viajes realizados, especificando los transbordos necesarios; el motivo de viaje; los modos alternativos considerados al viajar; la frecuencia con que realiza el mismo recorrido; información sobre acompañantes; la hora preferida de viaje; y el costo del pasaje indicando quién pagó. Por último, en la encuesta se indaga acerca de la información socioeconómica del pasajero: ocupación, edad, género e ingreso (ver Figura 3.18)

**Figura 3.18 Formato de Encuesta de preferencia revelada**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN: ESTRUCTURAR E IMPLEMENTAR MODELO CONCEPTUAL QUE PERMITA CUANTIFICAR LA DEMANDA ACTUAL, ESTIMAR LA DEMANDA FUTURA Y DETERMINAR LA MOVILIZACIÓN DE PASAJEROS EN LOS MODOS TERRESTRE POR CARRETERA, FLUVIAL, FERROVIARIO Y AÉREO A NIVEL NACIONAL E INTERNACIONAL**

**PRUEBA PILOTO MODO FLUVIAL EN LA CUENCA DEL MAGDALENA**

**PREFERENCIAS REVELADAS**

Puerto  Punto  Empresa  Embarcación  DIGITADOR

Fecha  /  /  Hora de Encuesta  Hora de despacho  Hoja  De  Código Embarcación

Origen  Destino

Encuestador

**vehículos para Transbordos: M: Moto. A: Auto. B: Bus. T: Taxi. V: Avión. R: Río. E: Tren. N: Vía** **Momentos de Transbordo: ANT: Antes. DES: Después.**

1. Origen de su viaje  Ciudad  Municipio  Corregimiento  Vereda  Otro  Lugar

2. Destino de su viaje  Ciudad  Municipio  Corregimiento  Vereda  Otro  Lugar

3. ¿Utilizó o utilizará otro vehículo ó medio de transporte para realizar este viaje ?

**4. Existe otro modo de transporte para el viaje actual**

☐ SI ☐ NO

Cuál?

☐ Bus ☐ Carro ☐ Aéreo ☐ Tren

**5. Ocupación**

☐ ESTUDIO ☐ TRABAJO ☐ DILIGENCIAS ☐ HOGAR ☐ OTRO

**6. Motivo De Viaje**

☐ ESTUDIO ☐ TRABAJO ☐ DILIGENCIAS ☐ RECREACIÓN ☐ COMPRAS ☐ SALUD ☐ OTRO

**7. Frecuencia viaje?**

☐ >3 DIAS/SEM ☐ 1-2 DIAS/SEM ☐ 1-2 DIAS/MES ☐ < 1 DIA/MES

**8. Viaja Acompañado?**

☐ SI ☐ NO

Cuántas Personas?

**9. Hora preferida de viaje**

**10. Cuanto costó el pasaje?**

**11. Quién pagó el pasaje?**

USTED ☐ EMPRESA ☐ OTRO ☐

**12. Lugar de residencia**

**13. Lleva equipaje pesado o carga?** ☐ NO ☐ SI

**14. Sexo** ☐ F ☐ M

**15. Edad**

**16. Ingresos**

☐ <\$300.000 ☐ \$300.000 - \$600.000 ☐ \$600.000 - \$1000.000 ☐ \$1000.000 - \$1500.000 ☐ más de \$1500.000

Fuente: Elaboración Propia

Los formatos de aforos y encuestas de viajes empleados para la toma de datos, incluyendo instructivos para su aplicación se encuentran en el Anexo 2.

Los aforos y encuestas de preferencia revelada se realizaron durante dos días típicos laborales y un día de fin de semana (jueves 7, viernes 8 y sábado 9 de mayo de 2009), en jornadas que permitieran captar todos los viajes que entraban y salían de cada uno de los puntos.

Las encuestas de preferencias declaradas (PD) se realizó únicamente en el Municipio de Magangué, tomando una muestra de 75 encuestas, que si bien no constituyen una muestra significativa de la población del municipio o de sus usuarios del transporte fluvial, permiten elaborar una modelación que evidencie las preferencia de los pasajeros en caso que se les ofrezca una opción carretera adecuada. En las encuestas PD se proponían 4 destinos alternativos: Barrancabermeja, El Banco, Majagual y Tiquisio; a los cuales, hoy en día, se puede acceder a través del modo fluvial pero las opciones carreteras son inadecuadas o nulas.

Para evaluar las elecciones que tomarían los usuarios, se propusieron 9 escenarios hipotéticos. El contexto de elección plantea la elección de modo de transporte, considerando dos alternativas: el transporte fluvial y el transporte terrestre. Los atributos considerados en la elección para describir cada alternativa fueron: tiempo de viaje, tiempo de espera y tarifa. Una vez establecidos los volares evaluados de cada variable se realizó un diseño de experimento ortogonal con ayuda del programa Ngene ®.

En la Figura 3.19 se muestran dos de los nueve escenarios presentados en la encuesta PD para el destino Majagual, donde se varían las variables exhibidas y luego se registra la elección tomada por el encuestado.

Figura 3.19 Ejemplo de escenario hipotético presentado en la encuesta PD

1	MAJAGUAL		TARIFA	TIEMPO	FRECUENCIA
			\$ 35.000	02:45	00:20
			TARIFA	TIEMPO	FRECUENCIA
			\$ 30.000	03:00	00:40

2	MAJAGUAL		TARIFA	TIEMPO	FRECUENCIA
			\$ 40.000	02:45	00:20
			TARIFA	TIEMPO	FRECUENCIA
			\$ 36.000	03:00	00:30

Fuente: Elaboración Propia

Las encuestas de preferencia declarada se realizaron durante 3 días laborales obteniendo una muestra de 75 encuestas, es decir 675 sub-individuos. Que si bien constituye una pequeña muestra, respecto a la población del municipio, permite desarrollar modelos que den una visión inicial de las preferencias de los usuarios del modo.

Después de realizada la toma de datos, se prosiguió a realizar la depuración y digitación de los datos.

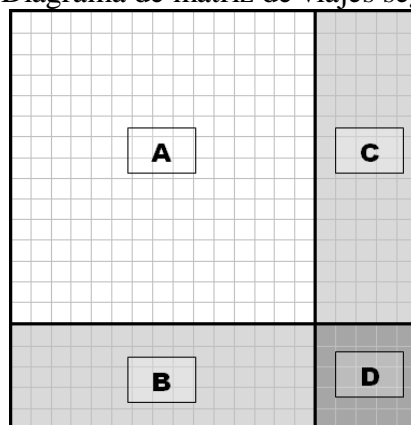
### 3.5 Zonificación

Las zonas establecidas se dividen en zonas internas y externas, lo que define el manejo que tendrán en los modelos.

Las zonas se dividen en internas y externas dependiendo de la influencia que ejerce el modo fluvial en ellas, por tanto los municipios ribereños se encontraran dentro de zonas internas, al igual que zonas cercanas, mientras que las zonas más alejadas se definieron como externas. Los viajes entre cada par origen destino obedece a la combinación de estos dos subgrupos, por tanto en la construcción de las matrices de viajes se pueden diferenciar cuatro grandes secciones, como se puede ver en la Figura 3.20.

En la sección “A” se encuentran los viajes entre zonas internas, en la “B” se encuentran los viajes originados en zonas externas con destino hacia las zonas internas, las casillas de la sección “C” corresponde a los viajes que se originan en la zonas internas y que se dirigen a zonas externas; finalmente, en la sección “D” se encuentran los viajes entre zonas externas pero que fueron captados en la zona de estudio puesto que pasan por la zona de estudio. El enfoque de la modelación se centra en la sección “A”; para el caso de las secciones B, C y D no se aplican los modelos hallados, pues las variables no explican de igual manera la demanda en estas zonas, como sucede en las zonas internas. En el estado de la práctica, para la estimación de los viajes futuros que involucran zonas externas, se utilizarán factores de crecimiento basados en alguna característica que explique la tendencia de los viajes.

Figura 3.20 Diagrama de matriz de viajes según las zonas



Fuente: Elaboración Propia

Los principales aspectos que fueron tenidos en cuenta para zonificar el área de estudio en el modo fluvial fueron la cercanía del municipio al río, los niveles de demanda y la división política administrativa. A continuación se presentan en detalle los criterios de zonificación.

### 3.5.1 Criterio de zonificación

Para realizar la zonificación se debe tener en cuenta varios aspectos. El primero de ellos es establecer tamaños similares de zonas, minimizando el error de agregación causado por la suposición de las actividades concentradas en el centroide. También se consideró que la zona fuera homogénea en términos de la población, la composición demográfica y la actividad económica. Adicionalmente en el interior de cada zona se debe definir un

centroide natural, el cual comúnmente coincide con algún centro urbano en donde se concentran la mayoría de los viajes generados y atraídos.

Otro aspecto a considerar es la influencia del corredor estudiado en la zona de influencia. A medida que una zona se aleja del corredor analizado, los viajes relacionados disminuyen; es decir, la gran mayoría de los viajes captados en el corredor se espera tengan como origen y/o destinos municipios cercanos a la cuenca del río Magdalena. Por tal motivo, la zonificación en cercanías al río es a nivel municipal y para el resto del país es a nivel de departamentos o conjuntos de departamentos. Estas divisiones se tomaron de acuerdo a la compatibilidad político administrativa, considerando que existen particularidades de acuerdo a esta división

### 3.5.2 Codificación y nomenclatura de las zonas

El código de zona consiste en un número de cuatro dígitos para las zonas internas y externas nacionales y de cinco dígitos para las zonas externas internacionales.

Para las zonas internas y externas nacionales, los primeros dos dígitos corresponden al código DANE del departamento del cual la zona hace parte. En el caso de que una zona esté conformada por más de un departamento estos dígitos corresponden a aquel con mayor población. Los siguientes dos dígitos del código de zona corresponden a un consecutivo para cada zona de un departamento, comenzando por la zona que contenga a la capital.

Para el caso de agrupación de municipios, el nombre de la zona es aquel con la mayor población, y para el caso de agrupación de departamentos es una combinación de los nombres de los departamentos que lo conforman, con la excepción de: zona Llanos, zona Eje Cafetero y zona Distrito Capital DC, donde se les asigno un nombre representativo.

El caso de las zonas externas internacionales el código empieza con el número 1000 y ultimo dígito es un consecutivo (ver Tabla 3.3)

Tabla 3.3 Zonas externas internacionales.

Código y nombre de la zona	
10001 Venezuela	10005 Europa y África
10002 Norte América	10006 Centro América
10003 Ecuador y Perú	10007 Asia y Oceanía
10004 Sur América	

Fuente: Elaboración Propia

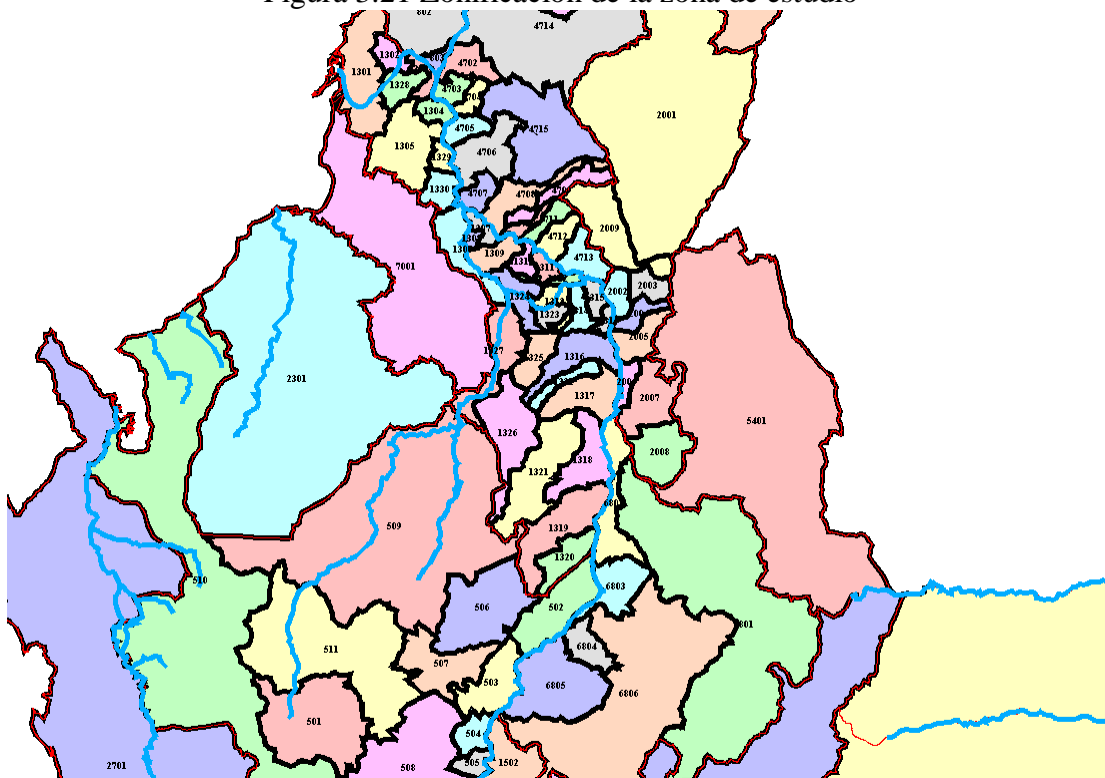
### 3.5.3 Zonas

Teniendo en cuenta los criterios mencionados en el numeral 3.5.1, se definieron un total de 95 zonas nacionales de las cuales 40 zonas son internas y 7 Internacionales. En general los

municipios ribereños o ubicados en la zona de influencia del río Magdalena fueron conformados a nivel de municipio y a medida que se alejaba de río se fueron agrupando desde conjuntos de municipios hasta conjuntos de departamentos.

En la Figura 3.21 se muestra la zonificación general del territorio nacional. En el Anexo 3.2. se encuentra la tabla con el código, el nombre y las características de cada zona.

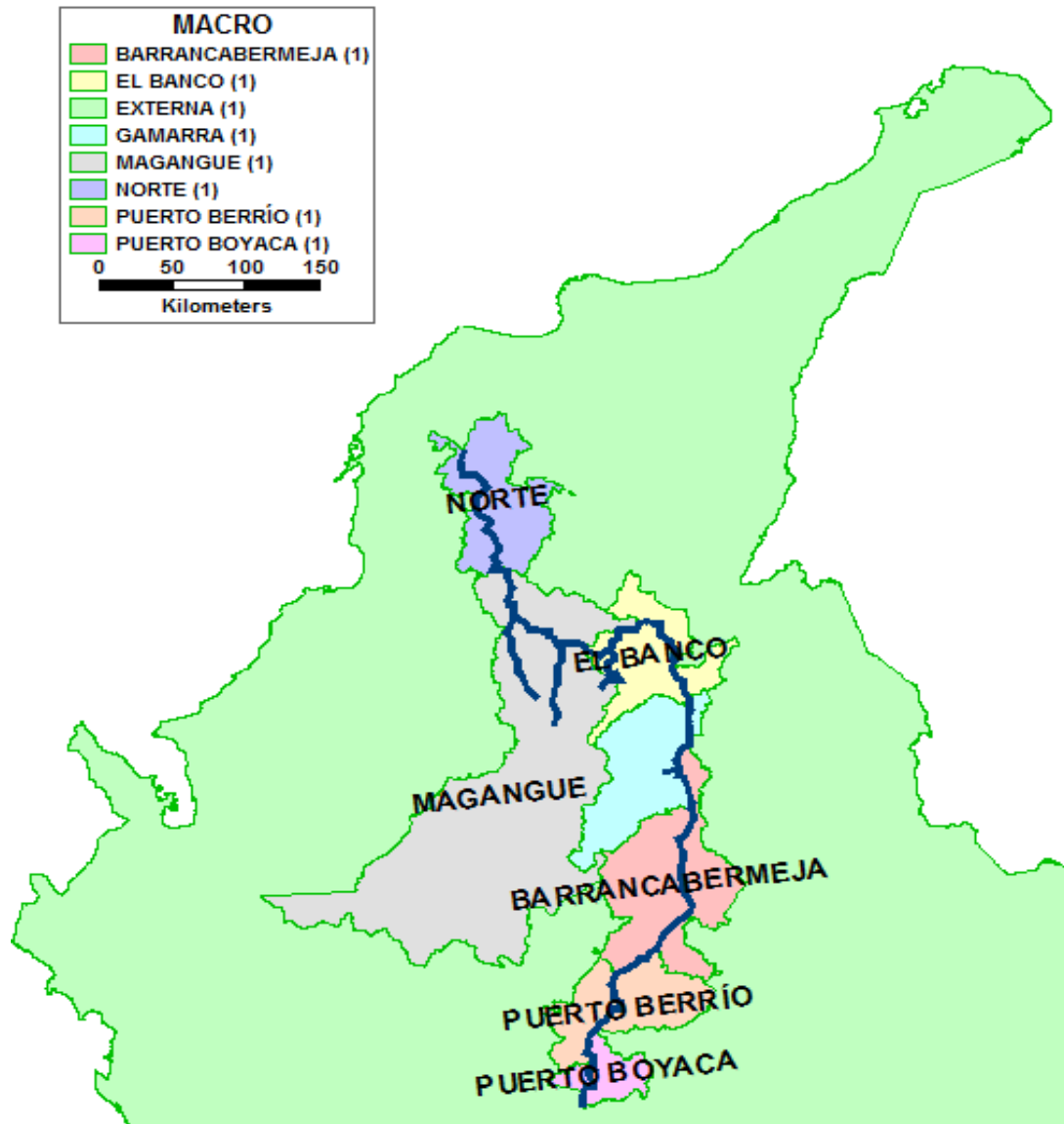
Figura 3.21 Zonificación de la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia

Para fines de presentación de los resultados, las zonas se reagruparon en ocho grandes macro-zonas, siete en correspondencia con la zona de influencia de cada puerto estudiado y una adicional externa que agrega el resto de las zonas. En la Figura 3.22 se ilustra la macro-zonificación.

Figura 3.22 Macrozonas



Fuente: Elaboración Propia

### 3.6 Cálculo de las matrices

Para el cálculo de las matrices, se define lo siguiente:

Sea  $d$  los días de estudio, donde  $d = \{\text{Jueves, Viernes, Sábado}\}$ ,  $p$  los puertos donde fueron recolectados los datos, siendo  $p = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$  (siguiendo la codificación mostrada en la Tabla 3.1. En cuanto a los viajes, se define  $i$  como el origen y  $j$  el destino de estos, mientras que para las embarcaciones,  $l$  será el origen y  $m$  el destino.



La cantidad de viajes con origen  $i$  y destino  $j$  que movilizan en las embarcaciones con origen  $l$  y destino  $m$  captados el día  $d$ ,  $v_{l,m}^{d,i,j}$ , es obtenida mediante las encuestas realizadas en los diferentes puertos y con esta información es posible definir una matriz de viajes.

Sea  $P_{l,m}^{d,p}$  el total de pasajeros que se movilizaron en las embarcaciones con origen  $l$  y destino  $m$  durante el día  $d$ , en el punto  $p$  y  $E_{l,m}^{d,p}$  la cantidad de pasajeros encuestados que se movilizaban en todas las embarcaciones con origen  $l$  y destino  $m$  durante el día  $d$ . Por lo tanto se define un factor de expansión para cada una de las embarcaciones con origen  $l$  y destino  $m$  durante el día  $d$  de la siguiente manera:

$$FE_{l,m}^{d,p} = \frac{P_{l,m}^{d,p}}{E_{l,m}^{d,p}} \quad 3.1$$

Teniendo el factor de expansión calculado con la anterior ecuación, se puede obtener la matriz expandida de viajes en el día  $d$  y en el puerto  $p$ , con la ecuación 3.2

$$V^{d,p} = FE_{l,m}^{d,p} \cdot v_{l,m}^{d,i,j} \quad 3.2$$

El día laboral para las matrices de viaje resulta ser el promedio de los viajes obtenidos el día jueves y el día viernes, que resulta ser de la siguiente manera:

$$V^{Laboral,p} = \frac{V^{Jueves,p} + V^{Viernes,p}}{2} \quad 3.3$$

Para un día típico de la semana, la matriz de viaje se obtiene con la ecuación 3.4

$$V^{Típico,p} = \frac{5V^{Laboral,p} + 2V^{Sábado,p}}{7} \quad 3.4$$

En los anexos digitales se encuentran las matrices por día  $d = \{Jueves, Viernes, Sábado, Día Laboral, Día Típico\}$ .

### 3.7 Análisis de las matrices origen – destino

A partir de los datos captados en los puertos durante el mes de mayo de 2009, se calculan los factores de expansión y se generan las matrices de viajes, con las cuales se evalúan la cantidad de viajes que se presentan entre cada par de zonas, en ambas direcciones. En el documento se presenta información completa de las zonas Calamar, Magangué, El Banco, Gamarra, Barrancabermeja, Puerto Boyacá y Puerto Berrío, en razón a que estos fueron los sitios donde se realizaron los aforos y las encuestas. Para las restantes se tiene la información que se captó desde los puntos de aforo.

En Tabla 3.4 se pueden observar la cantidad de viajes de un día típico, que tienen como origen y destino los diferentes puertos de estudio. Claramente se aprecia que los puertos de Magangué, El Banco, Puerto Boyacá y Barrancabermeja son los que más generan y atraen viajes, siendo el primero el más concurrido con una gran diferencia sobre el resto.

Tabla 3.4 Cantidad de viajes al día con origen y destino de los puertos estudiados

<b>CODIGO ZONA</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>VIAJES ENTRANDO</b>	<b>VIAJES SALIENDO</b>
1303	Zona Calamar	159	164
1306	Zona Magangué	1180	1243
4710	Zona El Banco	642	627
2006	Zona Gamarra	62	80
6803	Zona Barrancabermeja	332	289
1502	Zona Puerto Boyacá	440	658
503	Zona Puerto Berrío	120	99
502	Zona Puerto Nare	950	921

Fuente: Elaboración propia

### 3.7.1 Zona Calamar

En la Tabla 3.5 se encuentra el número de viajes de un día típico, que se realizan desde y hacia la zona de Calamar, teniendo en cuenta únicamente, aquellos municipios que frecuentemente interactúan con este puerto. La mayor cantidad de viajes se generan o atraen en las zonas de Piñon y Concordia, con alrededor del 90% del total de viajes desde y hacia Calamar

Tabla 3.5 Cantidad de viajes generados y atraídos en la zona de Calamar

<b>CODIGO ZONA</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>VIAJES ENTRANDO</b>	<b>% DE VIAJES</b>	<b>VIAJES SALIENDO</b>	<b>% DE VIAJES</b>
4703	Zona Concordia	60	37%	64	40%
4702	Zona El Piñon	87	53%	80	50%
1304	Zona El Guamo	3	2%	12	8%
	Otros	14	9%	3	2%
	Total	164	100%	159	100%

Fuente: Elaboración Propia

### 3.7.2 Zona Magangué

La Tabla 3.6 presenta la cantidad de viajes generados y atraídos por el municipio de Magangué en un día típico. Alrededor de la tercera parte de los viajes que llegan o salen de Magangué se realizan dentro de su zona; lo que refleja que son muchos los viajeros que se dirigen o provienen de los diferentes corregimientos que pertenecen a este municipio. También es notoria la cantidad de viajes desde y hacia las zonas de Mompo, Cicuco y

Pinillos, donde estos lugares abarcan casi el 36% de los viajes que salen y llegan a Magangué.

Por otro lado, de otros departamentos existen una cantidad importante de viajes atraídos y generados. Por ejemplo, desde el Departamento de Sucre (Zona Sucre), desde el Departamento del Magdalena (Santa Bárbara de Pinto, Santa Ana y El Banco) y también desde el Departamento de Bolívar (Talaigua Nuevo, Tiquisio, Montecristo y Achí).

Existen viajes a otros destinos, pero la suma de ellos representa sólo el 7,24% de los viajes que llegan desde Magangué y el 8,22% de los que salen hacia el mismo.

Cabe destacar que los viajes a Santa Ana, Talaigua Nuevo, Mompos y a los lugares adyacentes a estos, se realizan a través de Bodegas, corregimiento ubicado en el Municipio de Cicuco. Por lo anterior, se puede deducir que el número de embarcaciones entre Magangué y Bodegas es bastante alto.

Tabla 3.6 Cantidad de viajes generados y atraídos en la zona Magangué

<b>CODIGO ZONA</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>VIAJES ENTRANDO</b>	<b>% DE VIAJES</b>	<b>VIAJES SALIENDO</b>	<b>% DE VIAJES</b>
1306	Z. Magangué	388	31,1%	388	32,9%
1307	Z. Talaigua Nuevo	57	4,5%	54	4,6%
1308	Z. Cicuco	164	13,1%	159	13,5%
1309	Z. Mompos	194	15,6%	158	13,4%
1310	Z. San Fernando	8	0,6%	15	1,3%
1324	Z. Pinillos	88	7,1%	104	8,8%
1325	Z. Tiquisio	22	1,8%	15	1,3%
1326	Z. Montecristo	10	0,8%	2	0,2%
1327	Z. Achí	22	1,8%	24	2,0%
4707	Z. Santa Barbara	64	5,2%	50	4,2%
4708	Z. Santa Ana	36	2,9%	40	3,4%
4713	Z. El Banco	16	1,3%	11	0,9%
7001	Z. Sincelejo	18	1,5%	10	0,8%
7002	Z. Sucre	51	4,1%	23	1,9%
7003	Z. Guaranda	2	0,2%	13	1,1%
7004	Z. Majagual	14	1,1%	17	1,4%
	Otros	90	7,2%	97	8,2%
	<b>Total</b>	<b>1243</b>	<b>100,0%</b>	<b>1180</b>	<b>100,0%</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.7.3 Zona El Banco

La Tabla 3.7 muestra la cantidad de viajes de los lugares, que frecuentemente interactúa

con la zona de El Banco, en un día típico. Del municipio de El Peñón, que se encuentra ubicado en el Departamento de Bolívar, se observa que son el 40,03% del total de viajes que llegan a la zona. Por otra parte, el 38,76% de los viajes se dirigen a El Peñón. Las zonas de Barranco de Loba, San Martín de Loba y Hatillo de Loba concentran el 47,05% de los viajes que llegan y el 43,46% de los viajes que salen a la Zona El Banco.

Tabla 3.7 Cantidad de viajes generados y atraídos en la zona El Banco

<b>CODIGO ZONA</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>VIAJES ENTRANDO</b>	<b>% DE VIAJES</b>	<b>VIAJES SALIENDO</b>	<b>% DE VIAJES</b>
1306	Z. Magangué	11	1,8%	16	2,5%
1312	Z. Hatillo De Loba	52	8,3%	68	10,6%
1313	Z. Barranco de Loba	125	19,9%	109	17,0%
1314	Z. Martín De Loba	118	18,8%	102	15,9%
1315	Z. El Peñón	243	38,8%	257	40,0%
1323	Z. Altos del Rosario	12	1,9%	18	2,8%
1324	Z. Pinillos	19	3,0%	18	2,8%
2002	Z. Tamalameque	16	2,6%	12	1,9%
4713	Z. El Banco	8	1,3%	8	1,3%
	Otros	23	3,7%	34	5,3%
	Total	627	100,0%	642	100,0%

Fuente: Elaboración propia

### 3.7.4 Zona Gamarra

En la Tabla 3.8 están consignadas las cantidades de viajes generados y atraídos hacia la zona Gamarra en un día típico. La cantidad de viajes desde la Zona Morales hacia Gamarra representa el 40,32% del total de viajes que llegan a esta última, en el sentido contrario se tiene que el número de viajes es el 43% de los que salen de Gamarra. Similar a Magangué, es considerable la cantidad de viajes intrazonales. Hacia otras zonas, se destacan los viajes hacia Simití, Puerto Wilches, Aguachica y Barrancabermeja.

Tabla 3.8 Cantidad de viajes generados y atraídos en la zona Gamarra

<b>CODIGO ZONA</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>VIAJES ENTRANDO</b>	<b>% DE VIAJES</b>	<b>VIAJES SALIENDO</b>	<b>% DE VIAJES</b>
1317	Zona Morales	35	43,8%	25	40,3%
1318	Zona Simiti	8	10,0%	10	16,1%
2006	Zona Gamarra	11	13,8%	11	17,7%
2007	Zona Aguachica	0	0,0%	4	6,5%
6802	Zona Pto Wilches	3	3,8%	3	4,8%
	Otros	23	28,8%	9	14,5%
	Total	80	100,0%	62	100,0%

Fuente: Elaboración propia

### 3.7.5 Zona Barrancabermeja

Para la zona Barrancabermeja, la Tabla 3.9 muestra la cantidad de viajes que entran y que salen desde esta zona en un día típico. Las zonas San Pablo y Cantagallo, ubicadas en el sur del Departamento de Bolívar atraen el 50,87% de los viajes que salen de Barrancabermeja y origina hacia este mismo el 41,87% de los viajes entrantes.

Tabla 3.9 Cantidad de viajes generados y atraídos en la zona Barrancabermeja

<b>CODIGO ZONA</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>VIAJES ENTRANDO</b>	<b>% DE VIAJES</b>	<b>VIAJES SALIENDO</b>	<b>% DE VIAJES</b>
502	Z. Yondó	8	2,8%	3	0,9%
503	Z. Puerto Berrío	0	0,0%	7	2,1%
504	Z. Puerto Nare	6	2,1%	0	0,0%
1306	Z. Magangué	5	1,7%	8	2,4%
1318	Z. Simiti	7	2,4%	2	0,6%
1319	Z. San Pablo	103	35,6%	93	28,0%
1320	Z. Cantagallo	44	15,2%	46	13,9%
6802	Z. Puerto Wilches	43	14,9%	91	27,4%
6803	Z. Barrancabermeja	53	18,3%	54	16,3%
	Otros		6,9%		8,4%
	Total	289	100,0%	332	100,0%

Fuente: Elaboración propia

### 3.7.6 Zona Puerto Boyacá

Como se ha comentado anteriormente, los viajes originados y atraídos en Puerto Boyacá en general resultan de la interacción que tiene con Puerto Perales, corregimiento de Puerto Triunfo. Es evidente que la mayoría de los viajes de Puerto Boyacá salen o llegan de esta zona con un 68,69% y 51,93% del total respectivamente. Otra zona con la que interactúa significativamente Puerto Boyacá es Puerto Nare, hacia donde Puerto Boyacá despacha el 24,32% de sus viajes y recibe un 39% . Lo anterior se observa en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10 Cantidad de viajes generados y atraídos en la zona Puerto Boyacá

<b>CODIGO ZONA</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>VIAJES ENTRANDO</b>	<b>% DE VIAJES</b>	<b>VIAJES SALIENDO</b>	<b>% DE VIAJES</b>
504	Zona Puerto Nare	160	24,3%	172	39,0%
505	Zona Puerto Triunfo	452	68,6%	229	51,9%
508	Zona Carmen Del Viboral	19	2,9%	30	6,8%
1502	Puerto Boyacá	8	1,2%	8	1,8%

<b>CODIGO ZONA</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>VIAJES ENTRANDO</b>	<b>% DE VIAJES</b>	<b>VIAJES SALIENDO</b>	<b>% DE VIAJES</b>
	Otros	19	2,9%	2	0,5%
	Total	658	100,0%	441	100,0%

Fuente: Elaboración propia

### 3.7.7 Zona Puerto Berrío

En la Tabla 3.11. Se puede ver que más del 75% de los viajes que salen y llegan a Puerto Nare. Son pocos los viajes hacia otras zonas.

Tabla 3.11 Cantidad de viajes generados y atraídos en la zona Puerto Berrío

<b>CODIGO ZONA</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>VIAJES ENTRANDO</b>	<b>% DE VIAJES</b>	<b>VIAJES SALIENDO</b>	<b>% DE VIAJES</b>
502	Z. Yondó	0	0,0%	12	10,0%
504	Z. Puerto Nare	84	84,8%	94	78,3%
6803	Z. Barrancabermeja	7	7,1%	3	2,5%
6805	Z. Cimitarra	2	2,0%	10	8,33%
	Otros	6	6,0%	1	0,8%
	Total	99	100,0%	120	100,0%

Fuente: Elaboración propia

### 3.7.8 Zona Puerto Nare

Como se puede ver en la Tabla 3.12 más del 67% de los viajes que salen y entran a Puerto Nare son viajes intrazonales. Otros destinos importantes son Puerto Berrío y Puerto Boyacá, es decir que la mayoría de los viajes que se realizan en el modo fluvial desde y hacia puerto Nare son de corta distancia.

Tabla 3.12. Cantidad de viajes generados y atraídos en la zona Puerto Nare

<b>CODIGO ZONA</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>VIAJES ENTRANDO</b>	<b>% DE VIAJES</b>	<b>VIAJES SALIENDO</b>	<b>% DE VIAJES</b>
501	Z. Medellín	4	0,4%	17	1,8%
503	Z. Puerto Berrío	94	10,2%	84	8,8%
504	Z. Puerto Nare	637	69,1%	637	67,1%
1502	Z. Puerto Boyacá	172	18,7%	160	16,9%
2501	Z. Dc	8	0,9%	11	1,2%
	Otros		1,6%		5,4%
	TOTAL	922	100,0%	949	100,0%

Fuente: Elaboración propia

### 3.7.9 Síntesis del día típico

En la Tabla 3.13 se presentan los flujos resumidos producto de las embarcaciones en los diferentes puertos pertenecientes a la cuenca estudiada. El puerto de Magangué resultó ser el puerto con el mayor movimiento de embarcaciones con un total de 158 embarcaciones, sin distinción de llegada o salida, lo cual es consistente con las estadísticas que maneja el Ministerio de Transporte. Debe mencionarse que fue en ese puerto donde se dispuso del mayor número de puntos para recolección de información. Puerto Nare ocupó el segundo lugar con un total de 155 embarcaciones, mientras que los puertos de Barrancabermeja y Puerto Berrío, 46 y 12 embarcaciones, respectivamente.

Tabla 3.13 Flujo de embarcaciones día típico.

	EMBARCACIONES		
	LLEGADA	SALIDA	TOTAL
CALAMAR	46	43	89
MAGANGUÉ	79	79	158
EL BANCO	63	63	126
GAMARRA	30	32	63
BARRANCABERMEJA	22	23	46
PUERTO BOYACÁ	58	62	119
PUERTO BERRÍO	6	6	12

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos de flujos de pasajeros en todos los puertos, para cada uno de los días de la prueba están consignados en la Tabla 3.14, donde al igual que en el flujo de embarcaciones, Magangué resultó ser el puerto donde se presenta el mayor movimiento, con un máximo número de pasajeros transportados (1836 pasajeros) sin distinción de llegada, salida o día. Por otro lado, el Banco y Puerto Boyacá son los puertos más concurridos después de Magangué, consecuente con el número de embarcaciones que despacha y reciben estos puertos a diario.

Cabe destacar que el número de viajes que se muestran en la Tabla 3.14, incluye, además de los viajes que efectivamente se generaron o atrajeron en la zona del puerto, los viajes que se empiezan o terminan en cualquier otra zona, pero que tuvieron algún transbordo en el modo fluvial dentro de las zonas portuarias estudiadas. Por tal motivo, los viajes mostrados en esta tabla son mucho mayores que los promedios mostrados anteriormente.

Tabla 3.14 Flujo de pasajeros por puerto por día.

	PASAJEROS DIARIOS					
	Mayo 7		Mayo 8		Mayo 9	
	LLEGADA	SALIDA	LLEGADA	SALIDA	LLEGADA	SALIDA
CALAMAR	176	200	350	335	399	328
MAGANGUÉ	1299	1374	1508	1494	1506	1836

	PASAJEROS DIARIOS					
	Mayo 7		Mayo 8		Mayo 9	
	LLEGADA	SALIDA	LLEGADA	SALIDA	LLEGADA	SALIDA
EL BANCO	623	718	714	760	793	690
GAMARRA	224	271	194	185	172	208
BARRANCABERMEJA	323	386	561	503	494	460
PUERTO BOYACÁ	575	622	813	654	728	660
PUERTO BERRÍO	108	97	125	121	154	132

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3.15 se aprecia la cantidad de sillas ofertadas y demandadas en un día típico en cuanto a llegadas y salidas. Nótese que Barrancabermeja resultó ser el puerto con mayor ocupación, teniendo alrededor del 80% tanto para llegada como salida, seguido de Magangué y Puerto Nare. En contraste, Calamar y Gamarra son los puertos donde se aprecian la mayor cantidad de embarcaciones vacías tanto llegando como saliendo, con un promedio alrededor del 38%. Por consiguiente, se tiene una sobreoferta del 62% para la demanda en días normales, lo cual puede considerarse alto.

Hay un caso que merece especial atención en el Puerto de Gamarra. En este puerto, para llegar a Morales existe la posibilidad de tomar el ferry, el cual es gratuito y no tiene un límite establecido de cupos. Para fines de modelación, se asumió una capacidad bastante alta. Además, el ferry tiene una alta frecuencia, lo que incrementa la oferta de éste puerto, distorsionando en cierta forma el análisis de la sobre oferta. Debe considerarse que en Magangué también existe un ferry que permite el transporte de pasajeros, pero su frecuencia es mucho menor, lo que no afecta demasiado la oferta. De cualquier forma en ambos casos, la oferta en su gran mayoría está dada por el número de sillas disponibles en chalupas y motocanoas.

Tabla 3.15 Oferta y demanda día típico.

	Llegada Día Típico		Salida Día Típico		Ocupación	
	Oferta	Demanda	Oferta	Demanda	Llegada	Salida
CALAMAR	799	304	736	291	38,1%	39,4%
MAGANGUÉ	2.042	1.330	2.014	1.443	65,2%	71,6%
EL BANCO	1.141	712	1.141	712	62,4%	62,4%
GAMARRA	511	191	561	219	37,4%	39,0%
BARRANCABERMEJA	428	345	448	353	80,7%	78,8%
PUERTO SALGAR	896	453	963	401	50,5%	41,6%
PUERTO BERRÍO	118	67	120	51	56,8%	42,5%
PUERTO NARE	1.108	663	979	643	59,8%	65,7%

Fuente: Elaboración propia



## **4 MODELACIÓN CLÁSICA**

A partir de la información de los viajes realizados por el río Magdalena y definida la zonificación a utilizar, se realizó una adaptación del modelo clásico de 4 etapas, para lo cual se procedió con la especificación y calibración de los distintos sub-modelos que lo constituyen.

### **4.1 Modelo de generación y atracción**

Con el objeto de modelar el número de viajes basado en ciertos atributos de las zonas, en esta sección se formulan y estiman modelos de generación y atracción de viajes.

#### **4.1.1 Variables**

Se consideraron algunos variables que influyen en la generación y atracción de viaje, dentro de los cuales se encuentra el tamaño de la población, el número de cupos estudiantiles y el número de centros de salud por zona. Adicionalmente, se tuvo en cuenta las zonas en donde existen inspecciones fluviales, y una variable de accesibilidad.

La población de las zonas se obtuvo a partir de las estimaciones del Departamento Nacional de Estadísticas (DANE) para el año 2009.

La existencia de una inspección fluvial operando en la zona, se incluyó en la modelación mediante una variable binaria que toma el valor uno (1) si existe inspección fluvial en la zona, o cero (0) si no. Dado que esta variable puede ser más importante de acuerdo al tamaño de la zona, será incluida en los modelos interactuando con la población de cada zona.

Los centros educativos fueron considerados debido a la cantidad de viajes por motivo estudio que se realizan en el corredor. Esta variable será cuantificada a partir del número de cupos estudiantiles de estudios básicos y media vocacional por cada zona. Esta información se obtuvo a partir de la publicada en la página web del Ministerio de Educación, donde se encuentra una base de datos completa a nivel departamental y municipal (cabecera y resto) que incluye el número de estudiantes matriculados en todos los establecimientos educativos activos, tomando el reporte hecho en el mes de febrero del año 2010.

Igualmente los viajes por motivos de salud, suelen representar una componente importante del total de viajes en las zonas. Las visitas a centros de salud suelen realizarse por este modo principalmente desde corregimientos y veredas hacia los núcleos urbanos. Los corregimientos o veredas por lo general tienen un sistema de salud muy básico, y resulta natural que las personas se trasladen para obtener servicio de salud de segundo y tercer nivel. Por ese hecho, se involucró en el análisis la cuantía de centros de salud en cada zona y los servicios que allí se prestan. Esta información se recolectó a partir de la base de datos

de todos los prestadores de servicio, públicos y privados, a nivel departamental y municipal, discriminado por nivel de servicio y capacidad (camas), en la página web del Ministerio de Salud y Protección Social ([www.minsalud.gov.co](http://www.minsalud.gov.co)).

La variable de accesibilidad a cada una de las zonas se representó a partir de los costos generalizados de viaje hacia y desde la zona. Inicialmente se debe calibrar el modelo de distribución y obtener el parámetro  $\beta$  y la matriz de la función de costo (ver el numeral 8.2 de este informe). Para cada una de las zonas se aplica la ecuación 4.1, obteniendo un valor de accesibilidad (Daly, 1997).

$$ACC_i = LN \left( \frac{\sum_{j=1}^n \exp(-\beta c_{ij})}{\beta} \right) \quad 4.1$$

#### 4.1.2 Análisis de resultados del modelo de generación.

Para la construcción del modelo de regresión lineal se consideró el número de viajes generados en cada zona ( $V_i$ ); realizando distintas combinaciones de las variables explicativas que se habían obtenido. Las variables fueron incluidas en el modelo de forma aditiva y también a través de transformaciones matemáticas en la búsqueda de la mejor especificación del modelo. En cada caso luego de aplicar la regresión se verificaron las gráficas de residuos para determinar si existía heterocedasticidad, se tuvo especial cuidado de no incluir variables altamente correlacionadas en el modelo (F.J. Anscombe, 2007).

En las especificaciones de los modelos se verificó el signo de los parámetros, así como la significancia de los parámetros mediante la prueba *t*. El indicador de bondad de ajuste que se consideró para ayudar en la selección del mejor modelo lo constituye el  $R^2$ .

Las variables correspondientes a los centros de salud y de educación no se incluyeron en el modelo, porque presentaban una fuerte correlación con la población, ocasionando problemas con los signos y significancia de los parámetros. Dado que la población se consideró como una variable más adecuada para la modelación y de más fácil proyección, se decidió que lo mejor era incluirla en los modelos.

En este orden de ideas se calibró un modelo, como se muestra en la ecuación 4.2. Los valores entre paréntesis muestran el resultado de la prueba *t de student*. Como se puede observar, los parámetros poseen el signo esperado y son significativas, destacando que la presencia de inspección fluvial aumenta la generación de viajes.

La población (en miles) y la accesibilidad son relevantes en la explicación de los viajes generados. Naturalmente a mayor número de personas, mayor número de viajes. A su vez, es evidente que en tanto más facilidades de acceso tiene una zona, mayor disposición a

viajar de los usuarios. Debe resaltarse que la variable accesibilidad, es un reflejo de la calidad de los servicios y de las facilidades de acceso que tiene una zona en correspondencia con la oferta disponible de transporte. Así mismo el coeficiente de determinación ajustado es  $\hat{R}^2 = 0,89$ , lo cual indica un buen ajuste del modelo.

$$V_i = -20,45 + 1.09P_i + 4.32 \cdot P_i \cdot I_i + 2,31 \cdot ACC_i$$

(−0,79)    (4.29)    (11.24)    (2,39) 4.2

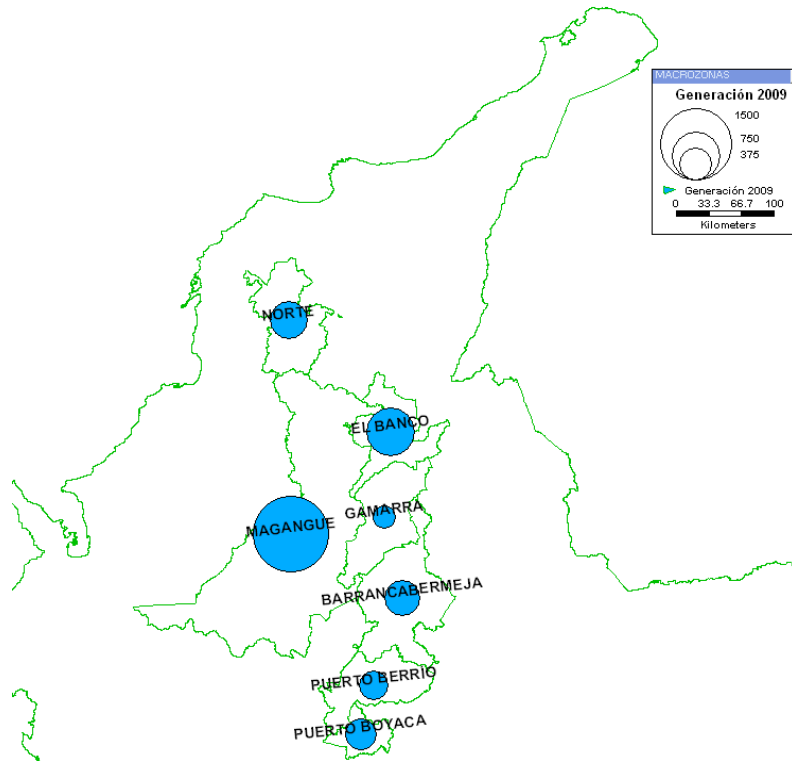
A pesar que el modelo calibrado tiene un buen ajuste y los parámetros de las variables son adecuados, la constante modal resultó poco significativa, razón por la cual se calibró un modelo prescindiendo de esta (ver ecuación 4.3). Como se puede apreciar los valores de los parámetros y los resultados de la prueba de *t de student* son similares al modelo anterior, incluso se obtuvo un coeficiente de determinación ajustado igual ( $\hat{R}^2 = 0,89$ )

$$V_i = 1.02P_i + 4.32 \cdot P_i \cdot I_i + 1.62 \cdot ACC_i$$

(4.36)    (11.33)    (4.06) 4.3

Por tanto, se tomó el modelo presentado en la ecuación 4.3, como el mejor acercamiento para la generación de viajes. En la Figura 4.1 se muestra una gráfica de la generación de viajes por zona. Los datos se encuentran agrupados en macro- zonas y muestran que el sector de Magangué es el mayor generador de viajes de pasajeros en la cuenca del río Magdalena. Para ver los resultados más detalladamente, ver Anexo 5.2.

Figura 4.1 Generación de viajes en el año 2009 en macro-zonas



Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.3 Análisis de resultados del modelo de atracción

Al igual que en generación, para los modelos de atracción fueron evaluados varias especificaciones, a partir de los criterios estadísticos y de bondad de ajuste.

Al igual que en el modelo de generación, las variables de centros de salud y educación fueron excluidas por las razones expuestas anteriormente. Así mismo, se consideró un modelo con constante modal (Ecuación 4.4), obteniendo como resultado que este parámetro es poco significativo. Nuevamente se decidió estimar el modelo sin la constante, obteniendo los parámetros mostrados en la ecuación 4.5

$$V_i = -22,41 + 1.29 \cdot P_i + 3.49 \cdot P_i \cdot I_i + 2.41 \cdot ACC_i \quad 4.4$$

(-0.81) (4.70) (8.38) (2.33)

$$V_j = 1.21P_j + 3.49 \cdot P_j \cdot I_j + 1.65 \cdot ACC_j \quad 4.5$$

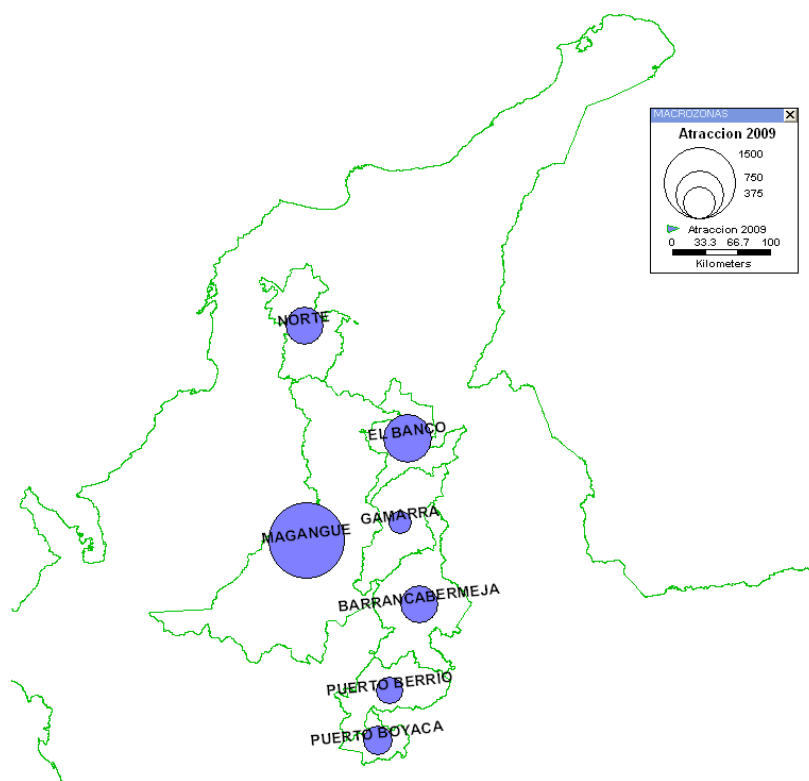
(4.77) (8.42) (3.79)

Al comparar con el modelo de generación se nota que la estructura es muy similar, al igual que los parámetros. Esto se explica porque la matriz de viajes diarios presenta gran simetría dado que muchos de los viajes realizados son pendulares.

Se aprecia en el modelo que los signos de los parámetros son correctos y que además son significativos. Se destaca, una vez más, la fuerza explicativa de la accesibilidad en los viajes y el hecho de que la presencia de inspección fluvial aumenta la probabilidad de que una zona atraiga más viajes.

En la Figura 4.2 se muestra una gráfica del número de viajes que son atraídos en cada una de las macro-zonas definidas. La tendencia es muy parecida a la que fue obtenida para el modelo de generación. Para ver los resultados más detalladamente, ver Anexos 5.4.

Figura 4.2 Atracción de viajes en el año 2009 en macro-zonas



Fuente: Elaboración propia

## 4.2 Proyección de los viajes generados y atraídos

La construcción de modelos de generación y atracción para las zonas de estudio, tiene

como objetivo obtener el número de viajes que salen o entran de una zona, dado ciertas características de las zonas que influyen en la demanda de transporte.

Para el caso particular de éste estudio, se desea estimar la generación y la atracción para el año 2015 y 2020. En tal evento se debe proyectar, para cada uno de estos años, las variables usadas en la estimación de los modelos de generación y atracción de viajes.

Tanto para generación como atracción, las variables que resultaron significativas fueron: la población, una variable que representa la accesibilidad en la zona, y la existencia o no de inspección fluvial en la zona. Esta última se considera constante, ya que no se espera que en un futuro próximo se instalen nuevas inspecciones fluviales. Con respecto a la población, se tomaron las proyecciones realizadas por el *Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE)*, para los años de interés.

La variable de accesibilidad se determina a partir de los costos generalizados de los escenarios especificados a futuro, realizando el mismo procedimiento utilizado para determinar el actual. Para el caso en estudio (años 2015 y 2020), lo importante es determinar una buena proyección de los costos económicos y el cálculo de los tiempos de viajes dado un cambio en el sistema de transporte. Para este estudio se ha definido un escenario, donde se dejaron constantes los costos de tarifa pero se modificaron los tiempos de viaje para la zona de Calamar y sus alrededores, suponiendo que la empresa transportadora obtuviera vehículos que pudieran alcanzar mayores velocidades, reduciendo los tiempos de viaje en un 20%.

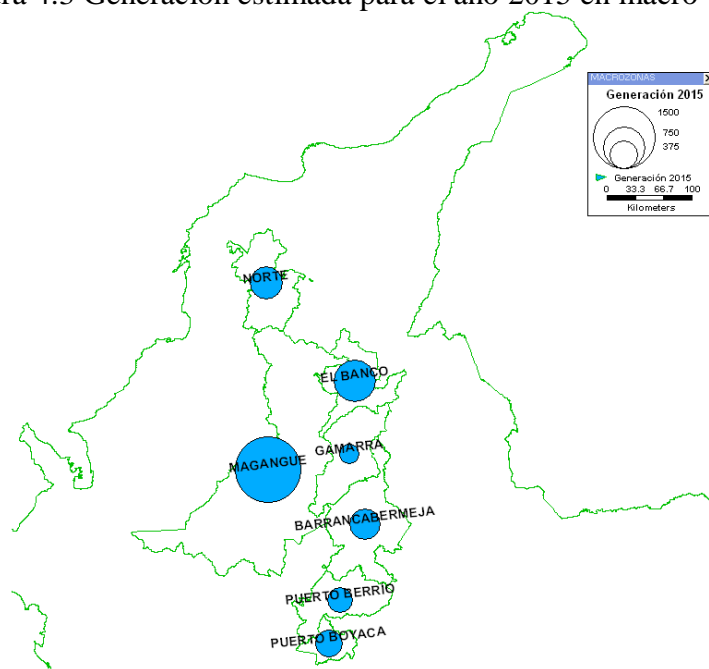
Luego de esto se puede estimar los viajes generados y atraídos simplemente remplazando las variables proyectadas en los modelos calibrados para el año actual. En la Tabla 4.1 se muestran el total de viajes generados y atraídos en cada una de las macro-zonas definidas para los años 2009, 2015 y 2020. Las Figura 4.3a la Figura 4.6 muestran gráficamente los viajes generados en cada macro-zona para el horizonte de los años 2015 y 2020. Para resultados adicionales ver Anexo 5.3 y 5.5.

Tabla 4.1. Número global de viajes generados y atraídos del año actual y proyectado

Macro-zonas	Generación 2009	Generación 2015	Generación 2020	Atracción 2009	Atracción 2015	Atracción 2020
Barrancabermeja	449	459	465	508	518	525
El Banco	795	808	818	784	797	811
Gamarra	210	223	231	210	223	231
Magangué	1677	1744	1803	1735	1812	1880
Norte	501	517	527	509	523	533
Puerto Berrío	315	341	364	288	312	332
Puerto Boyacá	373	391	404	343	359	372

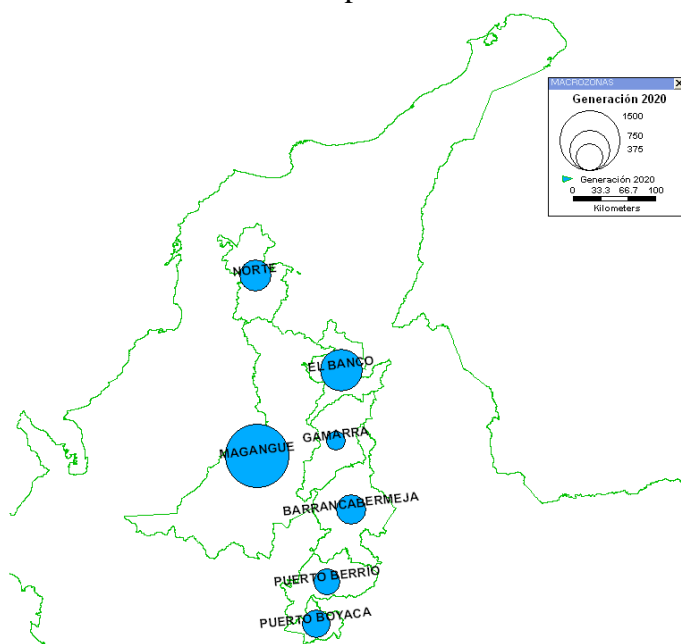
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.3 Generación estimada para el año 2015 en macro-zonas



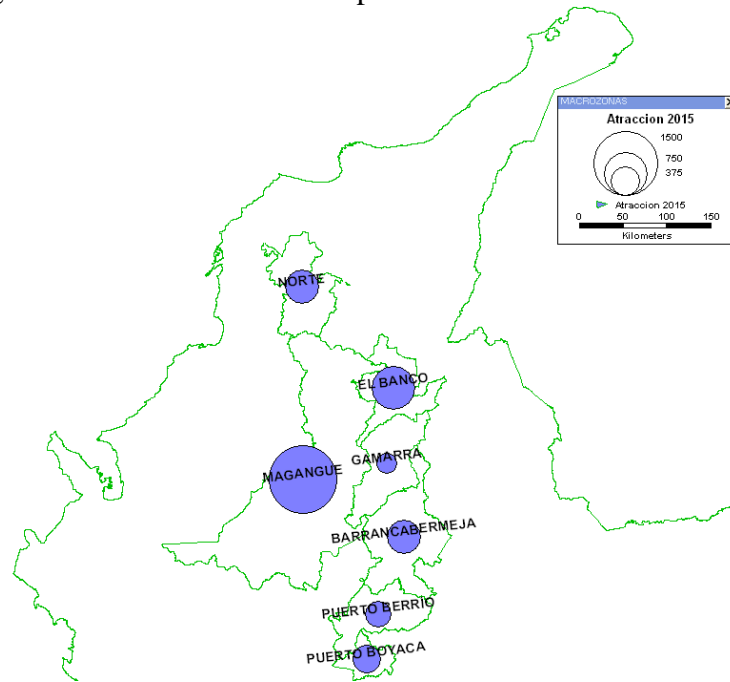
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.4 Generación estimada para el año 2020 en macro-zonas



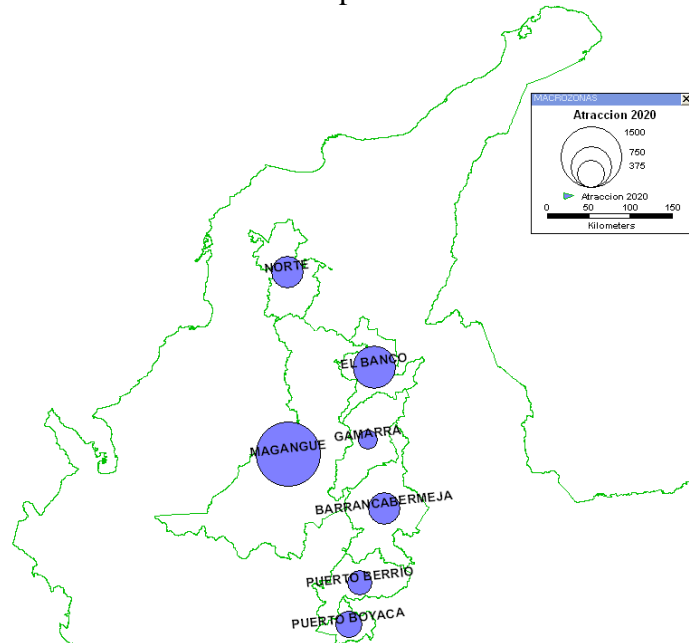
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.5 Atracción estimada para el año 2015 en macro-zonas



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.6 Atracción estimada para el año 2020 en macro-zonas



Fuente: Elaboración propia



### 4.3 Modelo de distribución

Estimados los modelos de generación y atracción, que definen los vectores de viajes en cada zona, sigue la determinación del número de viajes que se da entre cada par origen – destino, para lo cual se debe calibrar un modelo de distribución.

Para el desarrollo del modelo se debe disponer de una matriz de costo, que en este caso se realizará de manera generalizada, tomando la tarifa del viaje entre cada par origen-destino y agregándole un equivalente monetario del tiempo que toma ir de cada origen a cada destino. Un valor de tiempo promedio para los usuarios de 80 pesos el minuto fue estimado como se describe en el numeral 5.1.1 de este documento. El equivalente monetario del tiempo se obtuvo multiplicado el valor del tiempo por el tiempo de viaje para cada par origen destino.

En el desarrollo del modelo de distribución realizado, aplicado a las 29 zonas internas o de influencia directa de la cuenca del Magdalena, se estimó que el valor del parámetro  $\beta$  es de 0,048 (se puede ver el resultado en las matrices de viajes obtenidas de este modelo en el Anexo 6.2).

El desarrollo del modelo solo permite proyectar el número de viajes entre las 29 zonas internas de interés, pero es igualmente importante estimar los viajes hacia y desde las zonas externas. La aproximación más utilizada para distribuir los viajes hacia las zonas externas es la de factores de crecimiento a partir de una característica que resulta ser una variable explicativa de los viajes. En este caso, se encontró que la variable más adecuada para estimar un factor de crecimiento es el tamaño de la población, que resultó altamente significativa en los modelos de generación y atracción y que se es fácil de obtener y proyectar. Dado que en la distribución de viajes las poblaciones del origen y el destino influyen, se estableció un factor de crecimiento promedio como se indica en la ecuación 4.6

$$FC = \frac{(P_O^{futt} + P_D^{futt})}{(P_O^{act} + P_D^{act})} \quad 4.6$$

Donde  $P_O^{act}$  y  $P_D^{act}$  son los valores de la población actuales del origen y del destino,  $P_O^{futt}$  y  $P_D^{futt}$  son las poblaciones futuras de la zona de origen y de destino respectivamente, de acuerdo a las proyecciones hechas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), para los respectivos años..

#### 4.3.1 Proyecciones.

Para evaluar el modelo en el futuro es necesario definir un escenario en el que se realice la distribución, haciendo alguna suposición acorde con las reformas que podrían realizarse en

la zona de estudio.

Para este informe se supondrá que en la empresa Cootransfluviales, registrada en la Inspección del Municipio de Calamar reemplaza todos sus vehículos por unos capaces de alcanzar mayor velocidad, lo que reduciría el tiempo de viaje en un 20%, haciendo esta reforma se beneficiarían de igual forma las zonas de Zapayan, El Guamo, Concordia.

Adicionalmente, con los resultados del modelo de generación y atracción, proyectados a partir del escenario futuro propuesto; se utilizó el método Furness utilizando sucesivos factores de ajuste para cumplir con las restricciones en los orígenes y los destinos. Los resultados del proceso están disponibles en el Anexo 6.3.

En la Tabla 4.2 se muestra la distribución estimada para el año 2020 a nivel de las macro-zonas definidas.

Tabla 4.2. Distribución de viajes futuros en macro-zonas

	<b>Barrancabermeja</b>	<b>El Banco</b>	<b>Externa</b>	<b>Gamarra</b>	<b>Magangué</b>	<b>Norte</b>	<b>Puerto Berrío</b>	<b>Puerto Boyacá</b>	<b>TOTAL</b>
<b>Barrancabermeja</b>	144	47	54	53	48	6	182	1	<b>535</b>
<b>El Banco</b>	55	682	11	57	309	10	32	0	<b>1156</b>
<b>Externa</b>	74	69	89	117	420	152	60	54	<b>1035</b>
<b>Gamarra</b>	58	56	118	47	95	3	27	0	<b>404</b>
<b>Magangué</b>	57	323	359	73	816	83	43	0	<b>1754</b>
<b>Norte</b>	7	12	159	5	83	379	13	0	<b>658</b>
<b>Puerto Berrío</b>	210	29	24	29	36	12	896	182	<b>1418</b>
<b>Puerto Boyacá</b>	1	0	28	2	18	0	169	749	<b>967</b>
<b>TOTAL</b>	<b>606</b>	<b>1218</b>	<b>842</b>	<b>383</b>	<b>1825</b>	<b>645</b>	<b>1422</b>	<b>986</b>	<b>7927</b>

Fuente: Elaboración propia

En cada caso, el número de viajes internos dentro de cada macro-zona resultan mayores comparados con los viajes entre las demás zonas. Lo anterior se espera, ya que los viajes en el modo fluvial principalmente son de poca distancia.

Se puede destacar el caso de Puerto Boyacá, donde la mayoría de los viajes resultan dentro de la macro-zona definida, siendo un 77% de los viajes totales originados y 76% de los viajes atraídos. Actualmente, los viajes presentados en ésta zona son en su gran mayoría entre Puerto Boyacá y Puerto Triunfo, que son Municipios separados por el río.

En contraposición en el caso de la macro-zona de Gamarra, poco más del 50% de sus viajes son a macro-zonas externas. Se nota una importante interacción de esa zona con El Banco y Barrancabermeja.

Igualmente, el 27% de los viajes originados y el 24% de los viajes atraídos en la macro-zona de Barrancabermeja ocurren en el interior de la misma macro-zona.

En Magangué puede notarse que la mayor parte de los viajes están dentro de la zona de influencia directa, como sucede hoy en día.

#### **4.4 Modelo de asignación**

Para establecer la oferta de transporte fluvial en el río Magdalena, se define una asignación de los flujos en los arcos de la red, para lo cual en primer lugar se debe definir la red  $R(N,A)$ , conformada por una capa de nodos (N), que a su vez está compuesta por paraderos, que representan los puertos, a través de los cuales se realiza el acceso y egreso de los servicios fluviales y por centroides, que representan en un punto donde se concentran los viajes de la zona correspondiente. El segundo elemento que conforma la red son los arcos (A), donde cada uno tiene una función de costos  $f(T_{viaje}, C)$ , que depende del tiempo de viaje y la tarifa para circular por el arco A (Ortúzar & Willumsen, 2011).

En este caso se cuenta con un conjunto de arcos y nodos que definen la red fluvial estudiada y un segundo grupo conforman una red carretera básica que permite acceder desde los centroides de cada zona al puerto más cercano.

La red analizada era relativamente simple y poco densa; notándose que entre varios pares de zonas existía una única ruta posible; por este motivo solo se utilizó el método de asignación estocástica por equilibrio estocástico de usuario (SUE, de sus siglas en ingles) el cual es un método iterativo que empieza con la búsqueda de la ruta más corta desde el origen al destino (Sheffi, 1985), alterando sus componentes aleatoriamente con los términos de error. Los usuarios seleccionan una alternativa basándose en sus componentes como tiempo de viaje, tarifas o penalidades por transferencia. El modelo asigna los flujos a las rutas más atractivas y luego se realiza un ajuste del costo generalizado y se realiza una nueva iteración dando como resultado nuevos flujos. La asignación estocástica por equilibrio de usuario asume que los usuarios no tienen información completa de los atributos de la red y perciben el costo de distinta manera, con ello produce resultados más realistas. La modelación se realizó utilizando programa *TRANSCAD*, de *Caliper®* para obtener los resultados de la asignación.

Los modos de transporte consideradas para la asignación de los flujos demandados entre las distintas zonas son el ferry, la motocanoa y la chalupa. También se incluyeron rutas terrestres para permitir el acceso a los puertos. Se modelaron y representaron 136 rutas fluviales, que son el objeto primordial de este análisis. Adicionalmente se definió un conjunto de 34 rutas terrestres para la modelación, ya que mediante estas se permitió

modelar los accesos a los arcos conectores a nodos paraderos. Para describir cada una de estas se definió la frecuencia, el tiempo de viaje, y costos asociados.

Una vez que la topología de la red estuvo completamente definida, se procedió a darle características a la red; es decir, a establecer los parámetros necesarios para la modelación. En este sentido, se definió el tipo de arco (fluvial o carretera), asignándole características como velocidad, intervalo tiempo de transferencia, tarifa y capacidad, a cada uno de ellos. Así mismo se especifica que nodos operarán como paraderos de las rutas. En la realidad, los vehículos fluviales se detienen en casi cualquier lugar de la ribera para dejar o recoger pasajeros, pero para simplificar la modelación se asumió un solo puerto por zona. Por su parte, las rutas carreteras pueden tener incluso más de un paradero por zona pero solo funcionan como conectores entre las líneas, pues como se ha comentado anteriormente los servicios terrestres tienen como único objetivo conectar los puertos con los centroides alejados de las zonas fluviales.

Adicionalmente, en este estudio se utilizaron tarifas zonales, ya que el costo de viaje depende del destino al que se llega a pesar que se utilice la misma ruta. Por tal razón, no basta con considerar tarifa plana, ni aun una tarifa por servicio. Para la modelación se construyeron matrices de costos correspondientes para cada uno de los modos involucrados.

El costo generalizado de cada ruta de transporte en el modo fluvial depende de los siguientes parámetros: costo total del pasaje, tiempos de espera en abordajes, paradas y transbordos, tiempo real de viaje (tiempo total de viaje menos tiempos de espera) y número de transbordos.

Una vez especificados todos los parámetros se obtuvieron los flujos en cada sección de línea y naturalmente en cada arco, estableciendo un modelo actual del transporte fluvial y su asignación. Adicionalmente, se obtuvo la asignación sobre las líneas carreteras, que en realidad son solo servicios de acceso a los puertos y no reflejan la realidad.

En la Figura 4.7 se pueden ver los flujos sobre toda la red. Solo los arcos fluviales se marcaron con la escala de colores, las líneas terrestres se fijaron en negro puesto que en este estudio no se analiza la asignación carretera, por este motivo se asignó a los arcos carreteros, capacidades lo suficientemente grandes para que no se presentarán congestión.

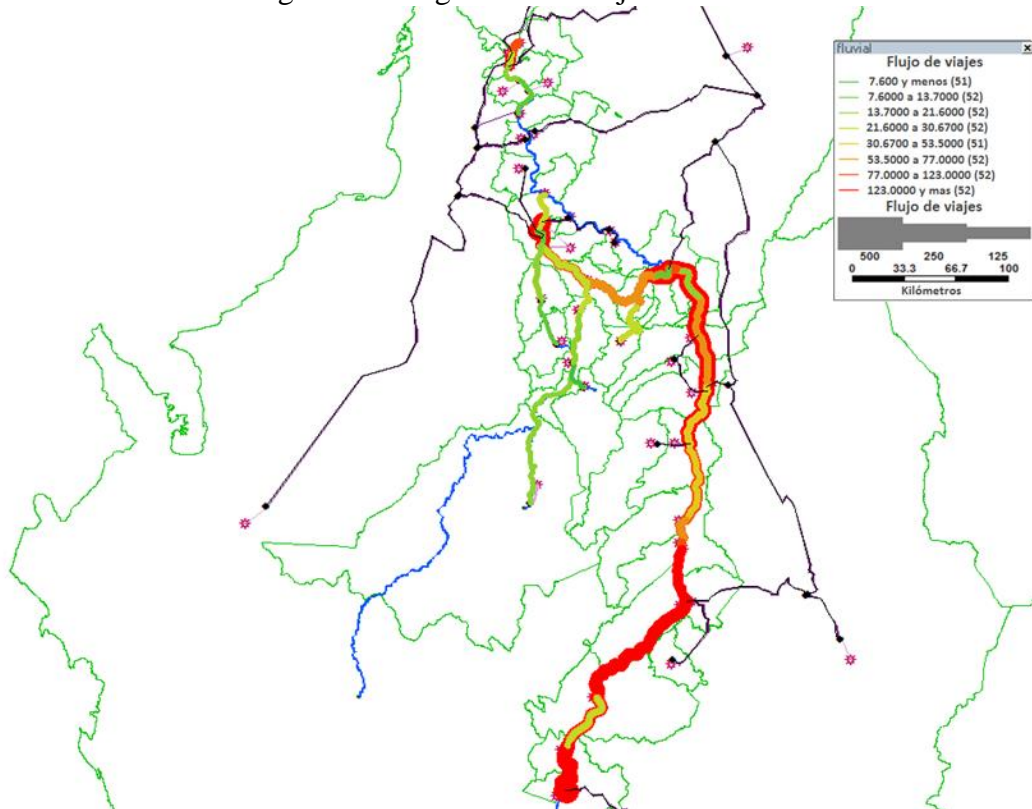
Debido a que algunas rutas se superponen, es usual que algunas estén más cargadas, y es posible que se vean arcos con varias franjas de distintos colores superpuestos. También puede ocurrir que a pesar que un arco posea varias líneas, la distribución de los flujos sea homogénea entre ellas y por tanto solo se pueda ver una franja de un solo color dentro de la escala.

De la Figura 4.8 a la Figura 4.12 se muestran los flujos totales que transitan por cada arco en ambas direcciones. Los arcos terrestres no se presentan para fijar la atención sólo en los flujos de operación fluvial. El grosor de las líneas determina el total de viajes, siendo las

más gruesas las líneas más cargadas.

Como se ve en la Figura 4.8 en la zona cercana a Calamar el arco más cargado corresponde al tramo entre Calamar y Pedraza, ya que por este transitan todos los viajes que entran y salen del municipio de Calamar.

Figura 4.7 Asignación de flujos en la red fluvial



Fuente: Elaboración propia

En las Figura 4.9 hasta Figura 4.12 se pueden ver los flujos sobre los arcos desde Magangué hasta Puerto Boyacá. Como era de esperarse los tramos más cargados son los que van de Magangué al Banco, ya que estos arcos no solo transportan pasajeros entre estas dos zonas y sus puertos intermedios, sino que además son arcos obligados para los viajes que se dirigen a Sucre, Majagual, Guaranda, Montecristo Achí, Nechi y Tiquisio. Naturalmente, los arcos que llegan a éstas últimas se encuentran menos cargados, pues funcionan más como arcos de acceso y solo transitan por estos, aquellos usuarios que efectivamente van hacia estos destinos.

Del Banco a Puerto Boyacá, los arcos se encuentran cargados considerablemente, manteniéndose en una proporción similar en todo el recorrido. Se puede ver un ligero

aumento del flujo entre Barrancabermeja y San Pablo. En términos generales, los flujos se mueven en un mismo orden de magnitud, lo cual resulta evidente si consideramos que el río en todo ese tramo es el principal modo de transporte para pasajeros.

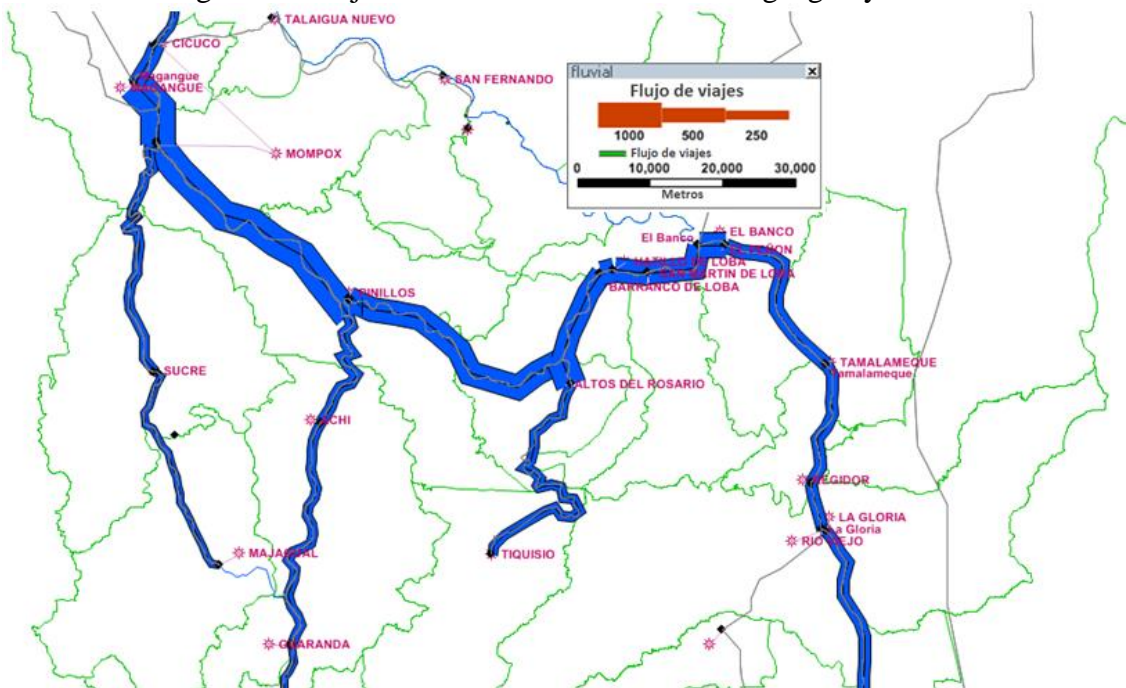
Figura 4.8 Flujos totales en los alrededores de Calamar



Fuente: Elaboración propia



Figura 4.9 Flujos totales de los arcos entre Magangué y El Banco

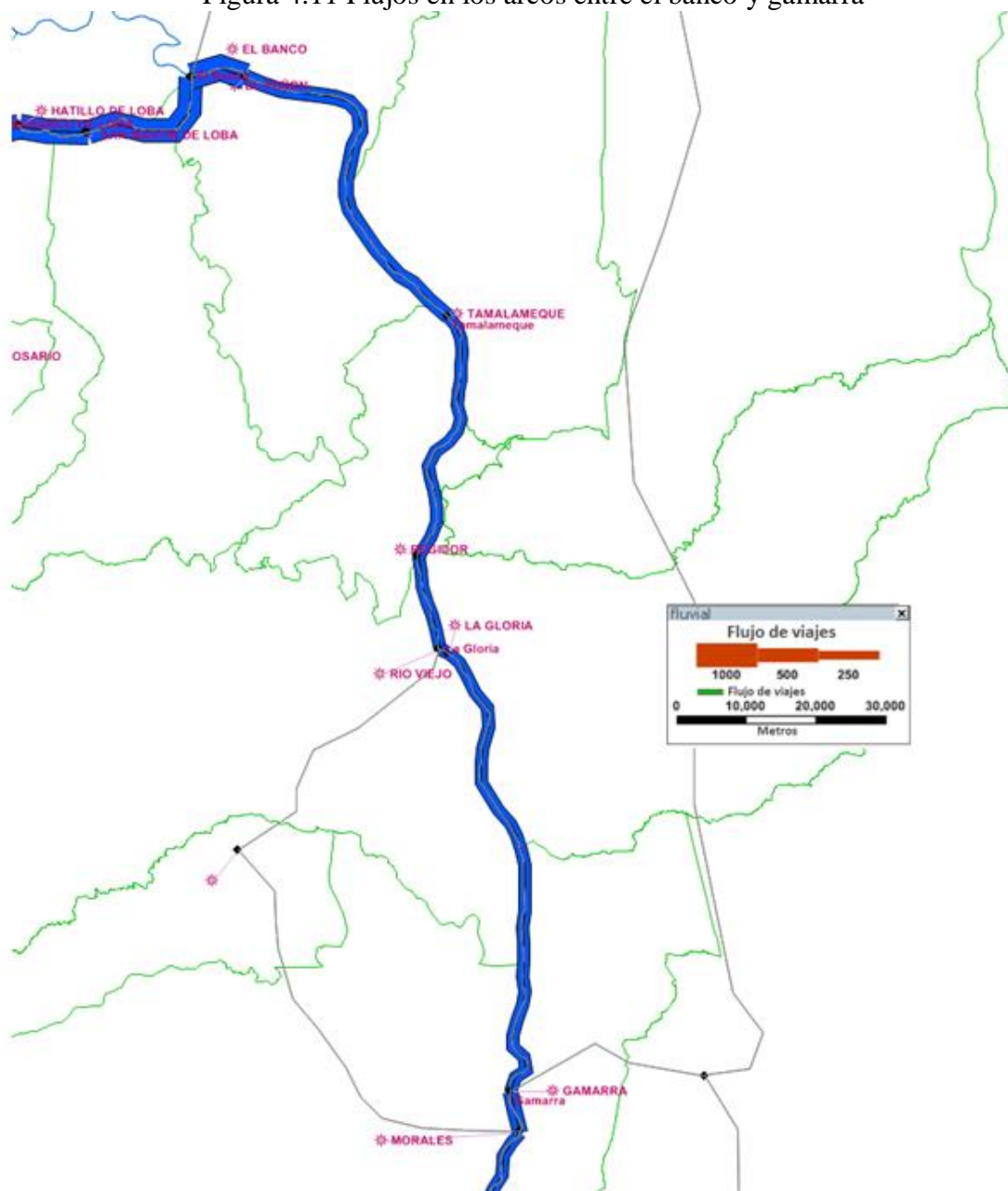


Fuente: Elaboración propia



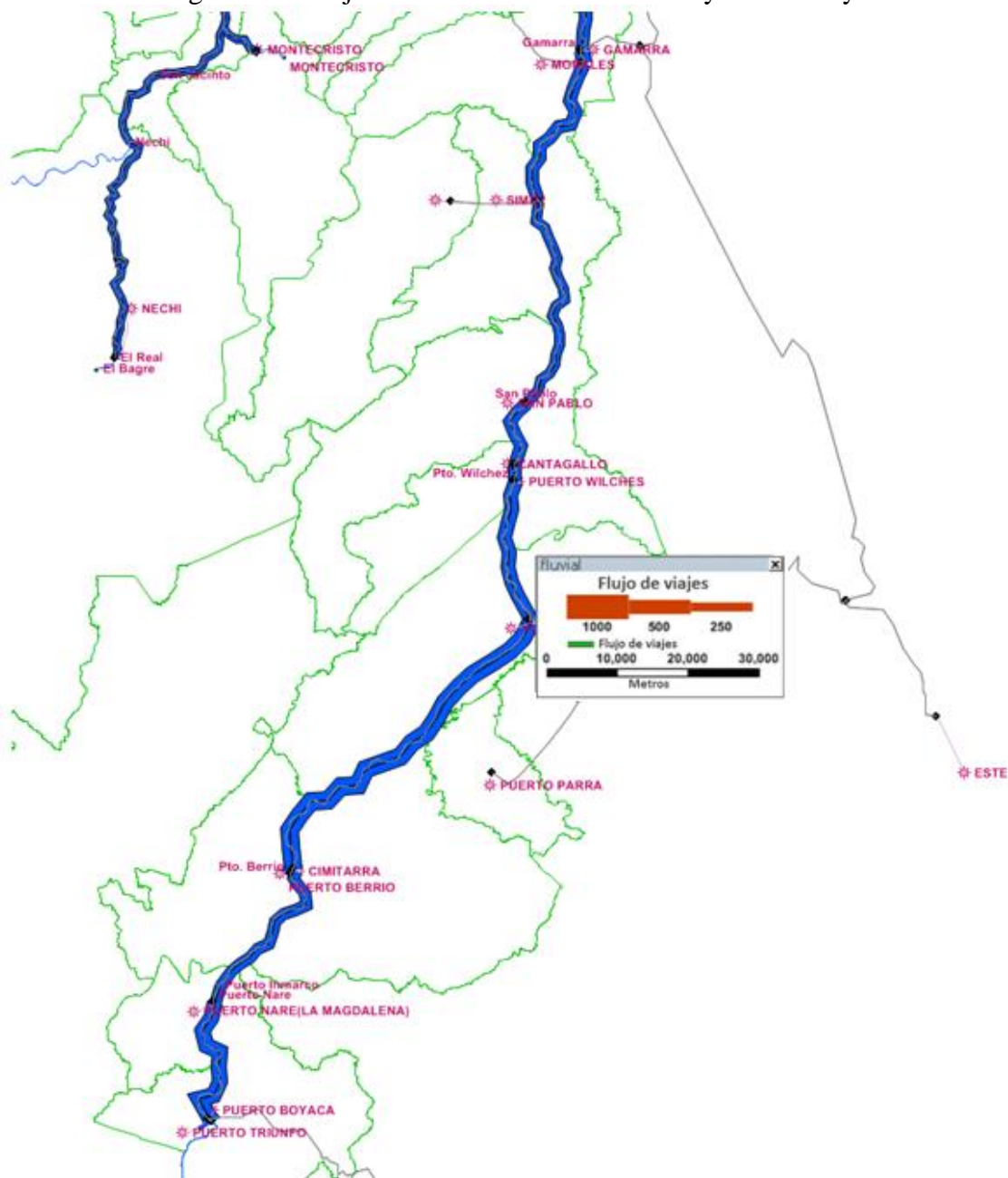


Figura 4.11 Flujos en los arcos entre el banco y gamarra



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.12 Flujos en los arcos entre Gamarra y Puerto Boyacá



Fuente: Elaboración propia

Dado que el costo generalizado depende de varios aspectos del viaje, como tarifa, tiempo de viaje, tiempo de espera, nos da la idea del gasto total que el viaje realizado le produjo al pasajero. En el Anexo 7.1.7 (en el archivo de Excel SKIM) o en el Anexo 7.3 se puede ver el costo generalizado de viajar entre cada par origen – destino.

Tabla 4.3. Valores mínimos y máximos para distintos atributos del viaje.

	Máximo	Mínimo
Costo Generalizado (miles de pesos)	1206,744	5,615
Tarifa (miles de pesos)	511,158	1.000
Tiempo en vehículo terrestre (min)	1474,183	0,000
Tiempo de espera inicial (min)	194,211	10,000
Tiempo de espera de transferencia (min)	550,500	0,000
Tiempo de viaje en Chalupa (min)	1181,082	6,600
Tiempo de viaje en Motocanoa (min)	541,528	5,337
Tiempo de viaje en Ferry (min)	13,832	5,337

Fuente: Elaboración propia

El máximo costo generalizado corresponde a viajar entre Puerto Parra y la zona de Plato, los cuales a pesar de ser municipios ribereños, primero se debe acceder por carretera a otra zona portuaria (Magangue y Barracanbermeja por ejemplo), para poder emprender el recorrido fluvial. Este viaje tiene un costo generalizado de \$COP 1'206.774, el cual resulta alto, aunque es consecuente con el viaje realizado, ya que gran parte del recorrido se realiza en modo fluvial, con la mayor tarifa reportada.

El costo generalizado mínimo, es el del viaje entre Puerto Triunfo y Puerto Boyacá. Estas dos zonas se encuentran cruzando el río y su iteración se puede comparar con una zona urbana, con alta frecuencia de viajes, lo que se traduce en bajos tiempos de espera y bajas tarifas.

El mayor tiempo de viaje en transporte fluvial corresponde al viaje entre la zona Tenerife y Puerto Parra, con más de 24 horas de tiempo dentro de un vehículo, es decir que si se llegará a realizar todo el recorrido por río, este sería el tiempo de viaje entre este par origen destino, sin embargo cabe destacar que no se registraron viajes entre estas zonas.

Por su parte se puede ver que el tiempo mínimo de transferencia y el tiempo mínimo en vehículo terrestre son cero, esto se debe a que no todos los viajes realizan transferencia o un trayecto carretero, en cuyos casos estos valores se deben ser nulos

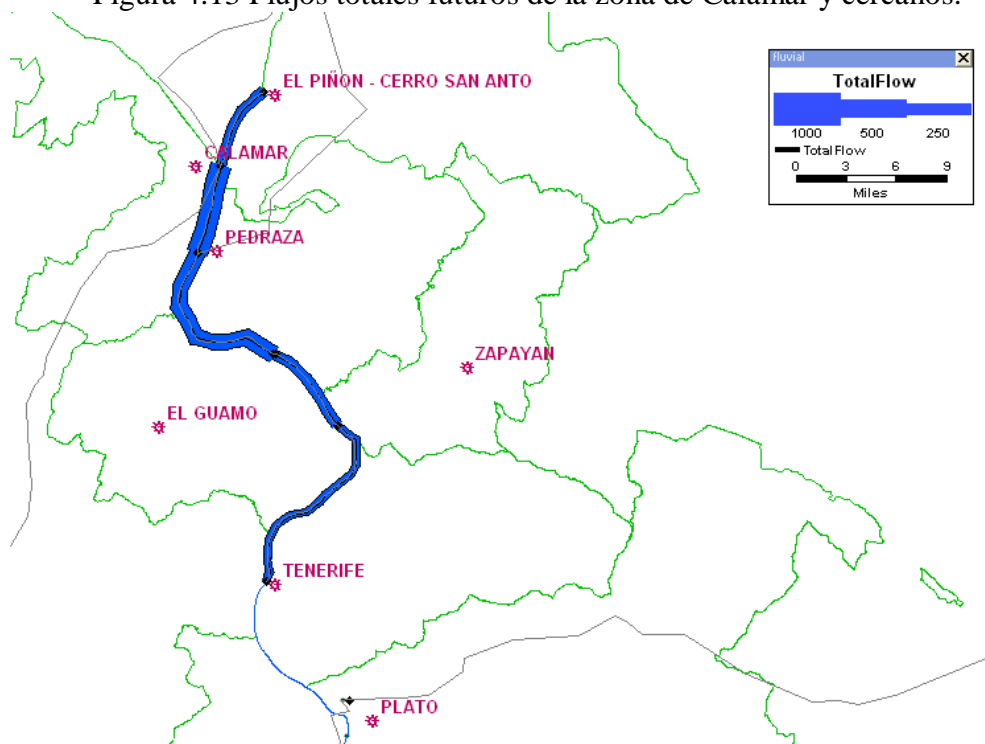
#### 4.4.1 Proyecciones

Para realizar la asignación futura se utilizó la matriz de demanda futura obtenida por el modelo de distribución determinando los cambios que se prevén hacer a futuro, considerando un corte temporal en el año 2015.

Los flujos que se presentan en el escenario futuro muestran pequeños cambios. En general, como se puede ver en de la Figura 4.13 a la Figura 4.17, los flujos aumentan aunque existe una reducción del número de viajes entre Gamarra y Barrancabermeja como se puede ver en la Figura 4.17.

A pesar que se espera un aumento en la demanda de viajes en los alrededores de la zona de Calamar, especialmente aquellos que transitan entre Calamar y Pedraza, la oferta inicial podría cubrir esta demanda con un manejo eficiente de los servicios de transporte.

Figura 4.13 Flujos totales futuros de la zona de Calamar y cercanos.

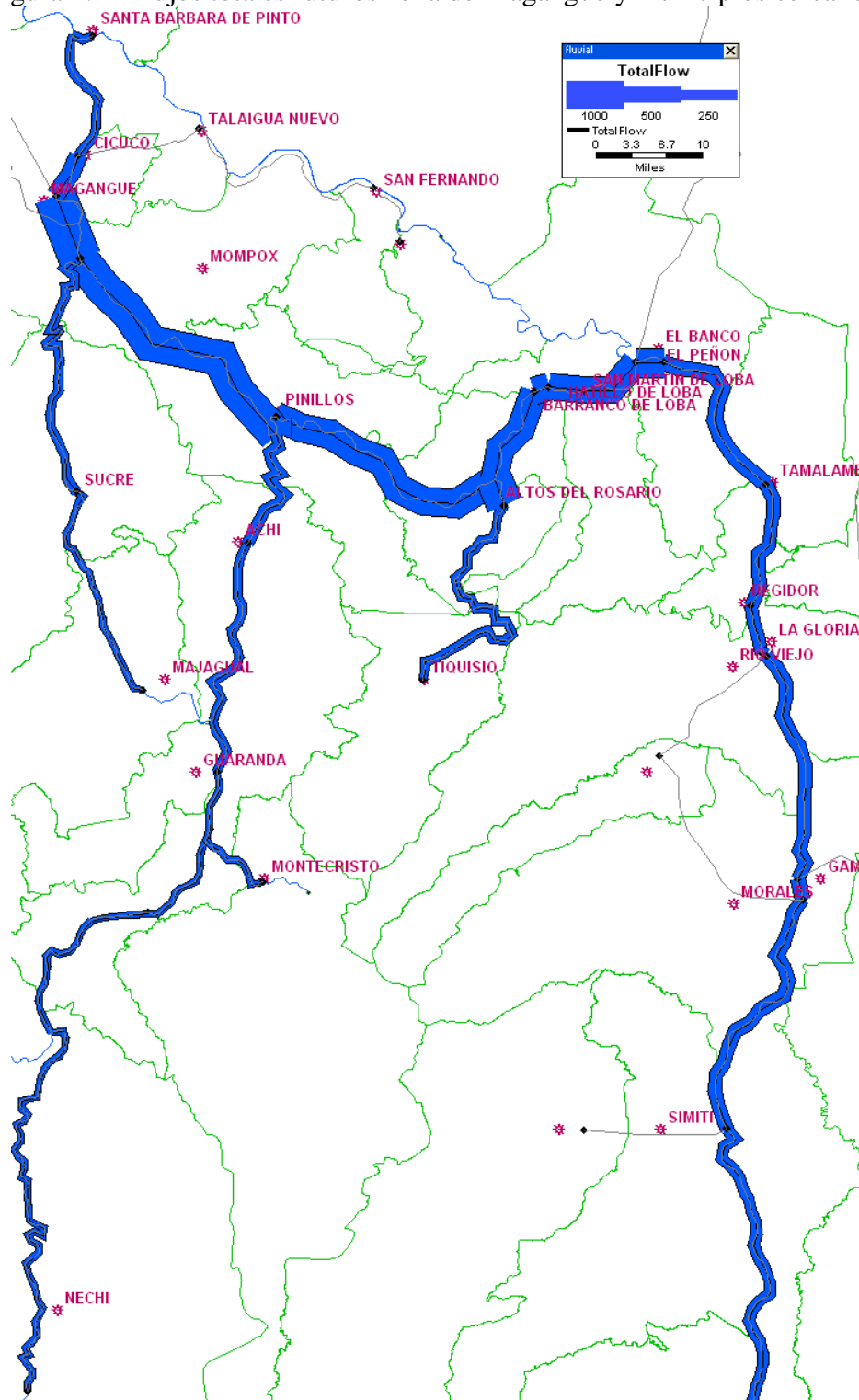


Fuente: Elaboración propia

En general los servicios actuales resultan suficientes para la demanda futura con algunas excepciones. En la zona entre Magangué y El Banco resulta necesario aumentar la oferta, ya que la suma de los flujos que transitan los arcos hacia los distintos destinos posibles congestiona la red en este tramo. Podría considerarse aumentar los servicios que hacen todo el recorrido desde Magangué hasta el Banco, pero se recomienda el aumento equitativo en todas las rutas que se presentan. Hecho que registrará si se permite la demanda y la oferta se equilibren por sí mismos.

Adicionalmente, se espera que los viajes entre Barrancabermeja y Puerto Berrío aumenten, por tanto se debería aumentar los servicios directos entre estas dos zonas. En parte el aumento de los viajes entre estas dos zonas son causa de los viajes que van hasta Puerto Nare o Puerto Boyacá. Los resultados de la modelación se pueden ver en los Anexos 7.1.

Figura 4.14 Flujos totales futuros zona de Magangué y municipios cercanos.



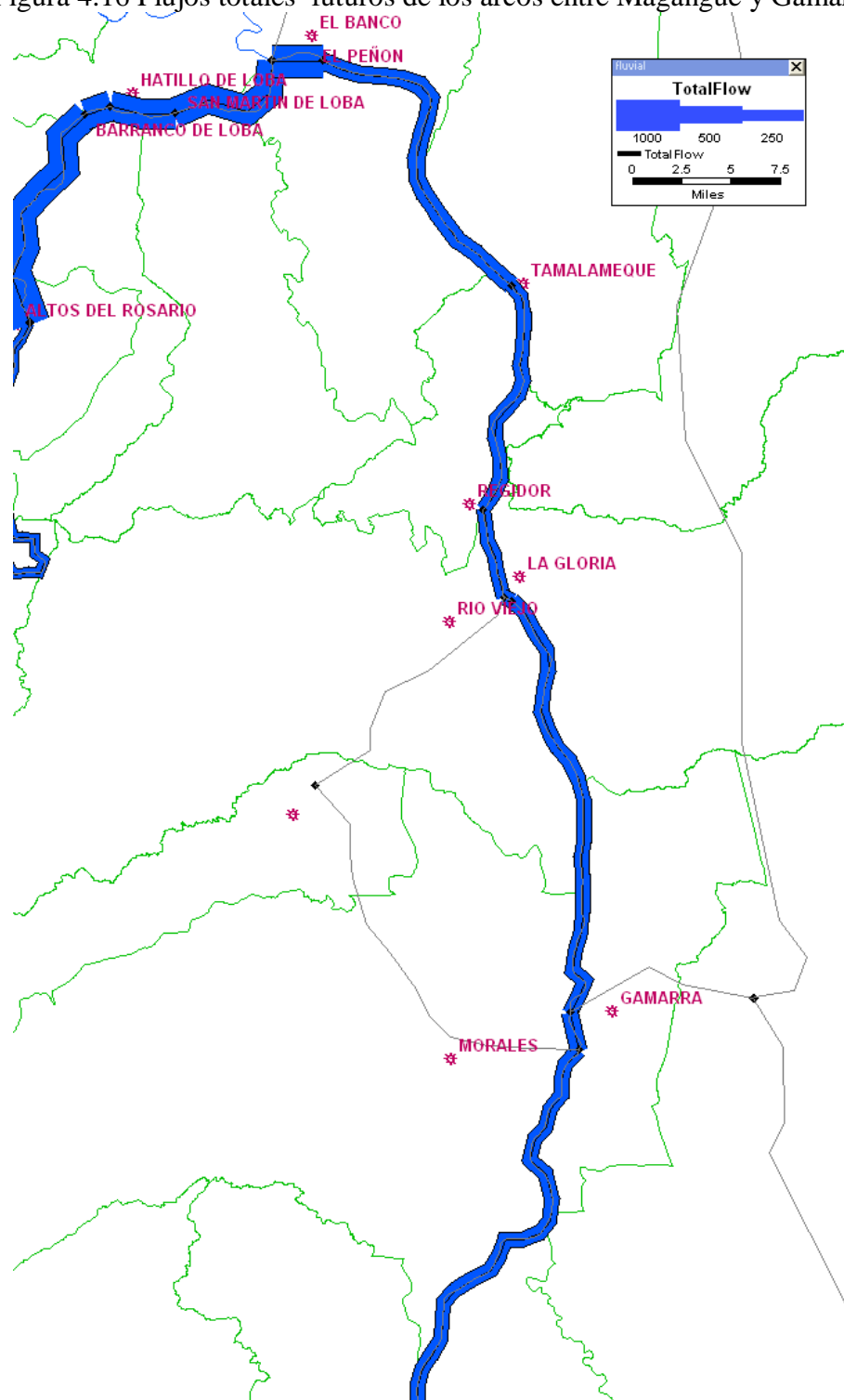
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.15 Flujos totales de los arcos entre Magangué y El Banco



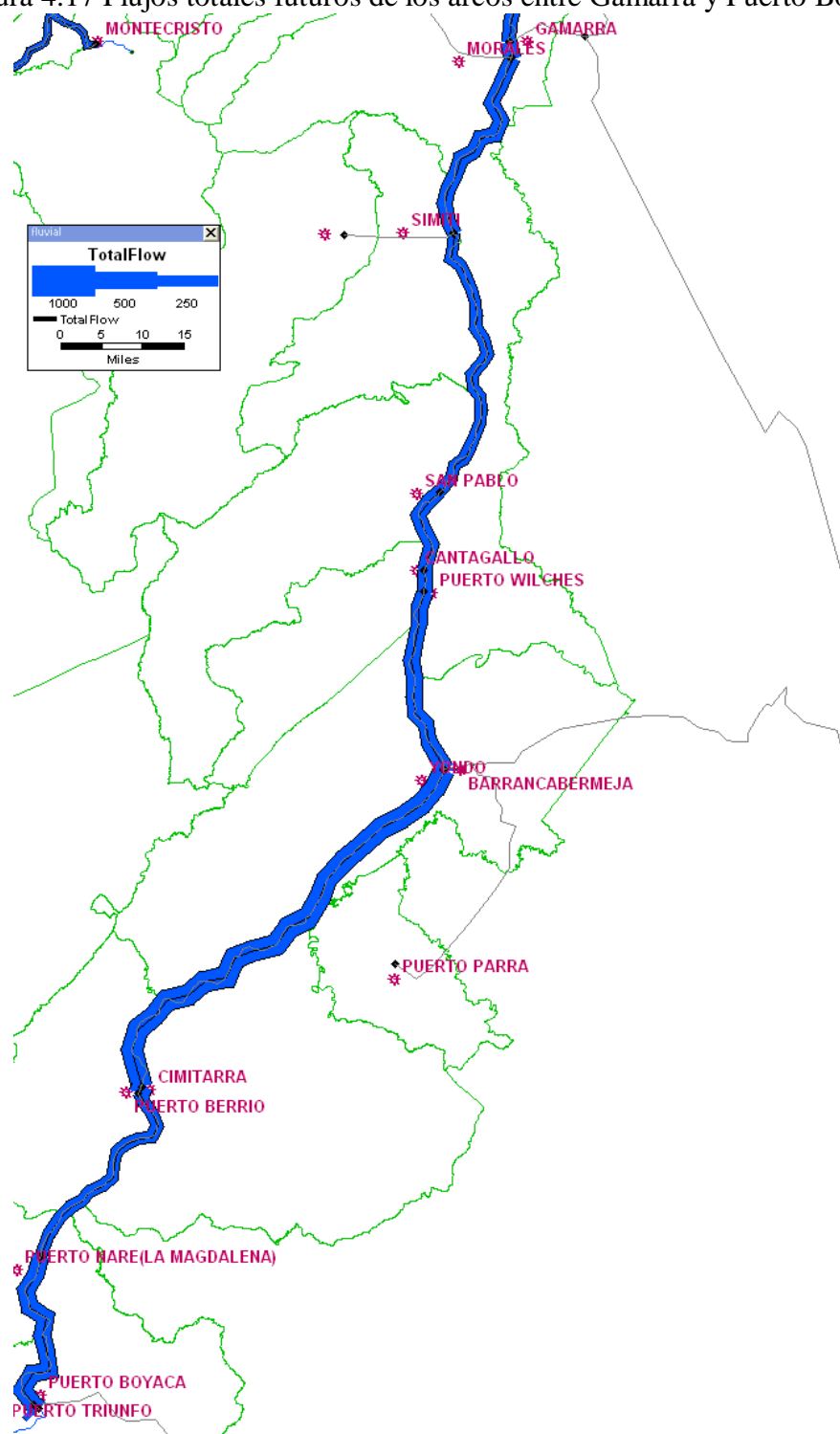
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.16 Flujos totales futuros de los arcos entre Magangué y Gamarra



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.17 Flujos totales futuros de los arcos entre Gamarra y Puerto Boyacá



Fuente: Elaboración propia



Tabla 4.4. Valores mínimos y máximos para distintos atributos del viaje. (escenario futuro)

	Máximo	Mínimo
Costo Generalizado (miles de pesos)	1207,973	5,616
Tarifa (miles de pesos)	510,105	1,000
Tiempo en vehículo (min)	1420,860	6,600
Tiempo de espera inicial (min)	180,000	10,000
Tiempo de espera de transferencia (min)	499,737	0,000
Tiempo de viaje en Chalupa (min)	1177,082	6,600
Tiempo de viaje en Motocanoa (min)	541,528	5,337
Tiempo de viaje en Ferry (min)	13,832	5,337

Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver en la Tabla 4.4, los valores máximos y mínimos no cambian demasiado respecto al escenario actual. Se aprecia que el costo generalizado, tanto el máximo como el mínimo aumentan, aunque no demasiado. En los demás casos se puede notar un leve descenso de los tiempos y los costos como era de esperarse, ya que en el escenario futuro no se modificaron los costos económicos, pero si se ajustaron las capacidades, de modo de satisfacer la demanda futura. Lo anterior conlleva a que los tiempos no se modifiquen significativamente.

Cabe destacar que el tiempo de espera mínimo de transferencia es cero, debido a que se presentan viajes en los que no se realizan por lo tanto este valor es nulo en estos casos.

## 5 MODELOS ALTERNATIVOS DE DEMANDA

Complementario al modelo clásico, se desarrollaron tres modelos alternativos que presentan algunas ventajas adicionales.

En primer lugar, se desarrolla un modelo de partición modal que indaga acerca de las preferencias de los usuarios del modo fluvial, en caso de disponer de medios carreteros adecuados como alternativa de transporte. En segundo lugar, se calibra un modelo de demanda directa que sintetiza la demanda del transporte en un solo paso, minimizando los errores del proceso secuencial. La segunda metodología planteada es un modelo de elección de destino, enmarcado en la teoría de elecciones discretas.

### 5.1 Partición modal

En la zona de estudio, es usual encontrar pares orígenes destino que no cuentan con vías carreteras adecuadas, por lo que los usuarios en estos casos solo pueden escoger entre alternativas fluviales. Por el motivo anterior, se aplicaron encuestas estableciendo escenarios hipotéticos, de modo que los usuarios pudieran escoger entre una opción en el modo carretero (bus) y el fluvial (Chalupa).

En cada escenario, al usuario se le daban unas condiciones de tarifa, tiempo de viaje y tiempo de espera, para cada alternativa y a partir de estas escogía la que consideraba como mejor opción.

Para la construcción del modelo se utilizaron los datos de las encuestas, sacando aquellos que se identificaron como cautivos o como usuarios que tomaban su decisión a partir de la regla lexicográfica y no por compensación, resultando una muestra de 243 pseudo-individuos.

La función de utilidad correspondiente a cada modo es la que se muestra en la ecuación 5.1. La variable *tiempo<sub>i</sub>* corresponde a la suma del tiempo de espera y el tiempo de viajes (en minutos) para la alternativa *i*. Se estimó de esta manera porque se determinó que no se estaban percibiendo los tiempos de manera diferente.

Como se mencionó anteriormente una de las constantes específicas (ASC) debe ser igual a cero debido a que el logit trabaja en base a diferencias entre las utilidades de las alternativas disponibles. Para identificar la ASC de una alternativa respecto a otra, se normalizó la constante específica de la alternativa fluvial (chalupa) igualándola a cero. Para estimar los parámetros del costo y del tiempo de viaje se utilizó el software *Biogeme 1.8* ®.

$$V_i = ASC_i + \theta_c \times COSTO_i + \theta_t \times TIEMPO_i \quad 5.1$$

Tabla 5.1. Parámetros de las funciones de Utilidad del modelo de partición modal

Parámetro	Valor	t-Test
$ASC_{bus}$	0,104	0.77
$ASC_{fluvial}$	0	-
Costo	-0,134	-2,21
Tiempo	-0,0107	-2,52
n	243	
$l(\theta)$	-164,4	
Rho cuadrado	0,03	

Fuente: Elaboración propia

Puede notarse que los parámetros del costo y del tiempo son significativos y poseen un signo correcto. Para resultados adicionales mirar Anexo 8.

### 5.1.1 Valor del tiempo

El valor del tiempo ha sido un tema de constante interés. Ciertas metodologías se han desarrollado para permitir su estimación soportadas en análisis microeconómico (Jara Díaz, 2007). En primer lugar el tiempo se considera un recurso finito que todos los individuos poseen en una misma cantidad fija. Este recurso a diferencia del dinero no puede ser almacenado, solo se puede realizar asignaciones de una cantidad de tiempo para cada actividad, realizando, si es necesario transferencias entre cada una de ellas de modo que se maximice la utilidad del usuario.

El costo asignado a cada actividad tiene un valor diferente, el cual puede ser medido de manera monetaria, asignándole un costo al tiempo usado en cada una de ellas. En términos monetarios, un individuo estará dispuesto a transferir una mayor cantidad de tiempo a la actividad que le produzca mayor satisfacción o utilidad; es decir, una persona con un valor de tiempo bajo preferirá tener un viaje un poco más largo pero a un menor costo, mientras que un usuario con valor de tiempo alto prefiere disponer su tiempo realizando alguna otra actividad, entonces escogerá tener un viaje más corto, aunque el costo sea mucho mayor (González, 1995).

Adicionalmente, la utilidad del individuo está sujeta a otros aspectos como lo son la comodidad, seguridad en el viaje, certeza en el tiempo de viaje y otros aspectos que no pueden ser medidos de manera analítica, sino que se debe realizar mediante un amplio estudio de estas variables.

El valor subjetivo del tiempo se obtiene considerando que equivale a la tasa marginal de sustitución entre el costo y tiempo, siendo la utilidad constante. Para este estudio se utilizó la ecuación 5.2 para el cálculo del valor subjetivo del tiempo de los usuarios del modo fluvial, obteniendo un valor de 80 pesos el minuto.

$$Vt = \frac{\beta_{tiempo}}{\beta_{costo}} = \$80 / \text{min} \quad 5.2$$

### 5.1.2 Análisis de elasticidades

La elasticidad es una medida económica para representar el grado del cambio de la demanda dado una modificación en sus variables. Ella representa de mejor manera el comportamiento que tienen los individuos en una situación de elección de acuerdo a los cambios establecidos en la oferta del transporte. Es de gran utilidad el conocimiento de la sensibilidad que tiene la demanda a cada una de sus variables al permitir la evaluación de políticas para alcanzar objetivos fijos.

Para modelos tipo MNL la elasticidad de punto está dada por la ecuación

$$E_{P_{iq}, X_{ikq}} = \frac{\partial P_{iq}}{\partial X_{ikq}} \cdot \frac{X_{ikq}}{P_{iq}} \quad 5.3$$

A partir de la cual se puede deducir

$$E_{P_{iq}, X_{ikq}} = \theta_{ik} X_{ikq} (1 - P_{iq}) \quad 5.4$$

La elasticidad representa la variación de la probabilidad de elegir  $A_i$ , respecto a una variación marginal del  $k^{esimo}$  atributo  $X$  para el individuo  $q$ . Para el análisis general de todos los individuos se tomó el promedio de las elasticidades directas tanto para el costo, como para el tiempo; obteniendo que la elasticidad media del costo es -2.67. A su vez, la elasticidad del tiempo resultó ser -1,24. En ambos casos la elasticidad es bastante alta, lo que indica que la demanda es muy sensible a la variación de estos dos atributos. Por otra parte, se obtuvieron también elasticidades para quienes escogieron el bus y para quienes escogieron el modo fluvial.

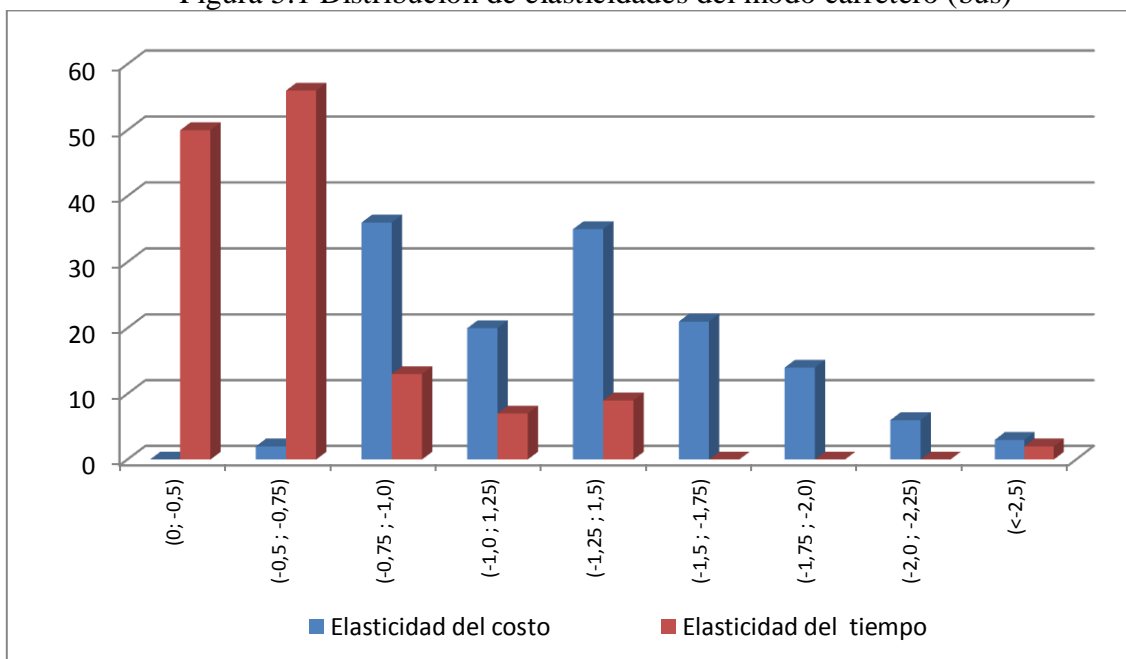
Tabla 5.2. Elasticidades por variable y por modo

	Costo	Tiempo
Bus	-1.419	-0.670
Chalupa	-4.153	-1.910

Fuente: Elaboración propia

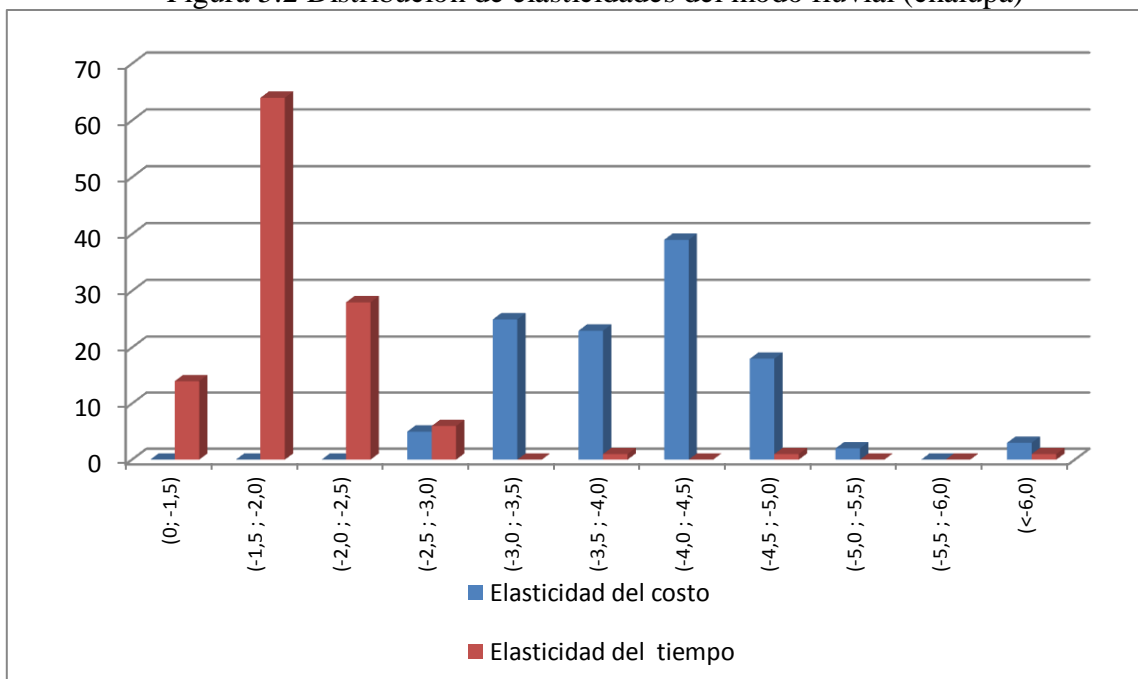
Como se puede ver en la Tabla 5.2. Las elasticidades del bus son de menor magnitud, lo que indica que este modo es menos sensible a los cambios en el costo y el tiempo en comparación con el modo fluvial, manteniendo el precepto que la demanda es más sensible al costo que al tiempo. Hecho lógico si se considera que el valor del tiempo resulta relativamente bajo y por tanto los individuos están más influenciados por el costo que por el tiempo. En el caso del modo fluvial, resulta más sensible a los cambios de ambas variables.

Figura 5.1 Distribución de elasticidades del modo carretero (bus)



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.2 Distribución de elasticidades del modo fluvial (chalupa)



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5.1 y Figura 5.2 se pueden apreciar la distribución de las elasticidades tanto para el costo como para el tiempo por individuo. En general no parecen ajustarse a una distribución de probabilidad específica.

Se puede observar que las elasticidades para el caso carretero difícilmente son menores de -2, estando el mayor cantidad de elasticidades entre -0,75 y -1 con el 26% de los datos; sin embargo, se debe destacar que así mismo 25% de los datos están entre -1,25 y -1,5. De cualquier forma estos resultados indican que la demanda de carretero, en este caso, es poco sensible a los cambios que se presenten en los costos

Para el caso del variable tiempo, la gran mayoría de datos son elasticidades mayores a -0,75, con más del 77% de los datos, dejando en claro lo poco elástico que es con respecto a esta variable. Es decir que debe existir un cambio bastante grande en el tiempo para que la demanda se vea afectada significativamente.

En el caso fluvial la demanda también es más sensible al costo con casi el 29% de los datos entre -4,0 y -4,5, lo muestra que la demanda es muy sensible a los cambios en la tarifa. Para la variable tiempo casi el 47% de los datos están entre -1,5 y -2,0, es decir que es considerable menos sensible a esta variable que al costo sin embargo sigue siendo bastante alto. Para obtener mayor detalle de las elasticidades individuales el lector puede remitirse al Anexo 8.3.

## 5.2 Modelo de demanda directa

Para la calibración del modelo de demanda directa se utilizó matriz de viajes expandida construida con la información obtenida de las encuestas de preferencia revelada (PR) y los aforos realizados a las embarcaciones. Además, se obtuvo de fuentes oficiales la información socioeconómica y demográfica de las zonas estudiadas.

El modelo propone utilizar una variable de dimensionamiento de las zonas, para dar proporción a la generación y atracción de viajes. Generalmente se utiliza la población y/o el ingreso del origen y del destino para la estimación de cada par de zonas. En este caso en particular se utilizó el producto de la población de la zona de origen y destino ( $P_i P_j$ ), ya que la población es una variable que tiene cambios más fáciles de predecir.

Luego de establecida la variable de dimensionamiento, se incluyen el listado de variables que resulten pertinente para explicar la demanda. En este caso se estableció una función de costo generalizado que incorpora la tarifa y el tiempo de viaje, para tratar el costo de viajar entre la zona de origen y la de destino como un todo. Para darle una unidad consistente se multiplicó el tiempo de viaje por el costo del tiempo hallado en el modelo de elección de modo y se obtuvo el valor de la función de costo generalizado en unidades monetarias, similar a la empleada en el modelo de distribución (CG).

También se utilizó la frecuencia del servicio (*frec*) entre cada par de zonas como una variable relevante. Considerando que la modelación se está realizando para el modo fluvial, no se tuvo en cuenta la frecuencia del acceso carretero al puerto para las zonas que lo necesitaban ya que: en primer lugar, existe una gran diversidad de modos de acceso al puerto, y en segundo lugar, porque se supone frecuencia del modo carretero lo suficientemente amplia para no representar mayores demoras en el tiempo de espera, mientras que los servicios fluviales tienden a ser más escasos.

Finalmente, se incorporó el número de transbordos (*transb*) en la modelación, pero como se trabajará con una función multiplicativa, donde el parámetro a calibrar es el exponente de cada variable, no es posible hacer la estimación de dicho parámetro cuando se tienen valores en cero. Por tanto se hizo una transformación exponencial. De esta manera la ecuación a calibrar se definió como la ecuación 5.5:

$$V_{ij} = \phi(P_i P_j)^{\theta_1} \cdot (CG)^{\theta_2} \cdot frec^{\theta_3} \cdot e^{\theta_4 \cdot transb} \quad 5.5$$

Para simplificar el proceso de calibración del modelo se linealizó la ecuación aplicando la función de logaritmo natural a ambos lados de la ecuación. Usando mínimos cuadrados se calibraron los valores de los parámetros (Blainey & Preston, 2010), dando como resultado el modelo demanda directa presentado en la Tabla 5.3 ( $R^2$  de 0,396).

En el modelo de demanda directa debe resaltarse que los parámetros de las variables explicativas pueden interpretarse como la elasticidad, notando que ésta es mayor para el

costo generalizado de viaje.

Tabla 5.3. Calibración de parámetros del modelo de demanda directa

Variables	Parámetro	Estadístico t
Constante ( $\phi$ )	6,72	7,38
$P_i P_j (\theta 1)$	0,16	4,18
$f_{(GC)} (\theta 2)$	-0,74	-8,39
Transbordos ( $\theta 4$ )	-0,38	-4,12
Frecuencia ( $\theta 3$ )	0,19	2,46

Fuente: Elaboración propia

En este caso, dada la construcción del modelo, las elasticidades corresponden al valor calibrado para cada parámetro, exceptuando la variable transbordo. Los resultados anteriores sugieren que en términos generales, los viajes generados son poco sensibles a las variables consideradas.

En el caso de la variable transbordo, la elasticidad está dada por la Ecuación 5.6, que en ningún caso será mayor de uno. Por tanto, al igual que las demás variables, el número de viajes es poco sensible al número de transbordos.

$$E_{transb} = -0.38e^{-0.38transb} \quad 5.6$$

### 5.3 Modelo de elección de destino

En este caso se evaluará la elección de destino del usuario, para lo cual se incluyó, además de las zonas internas, algunas zonas externas a pesar de no encontrarse en la ribera del Magdalena, ya que contaban con un buen número de viajes en el modo fluvial. El modelo se construyó con la información de las encuestas de preferencias reveladas, aprovechando la riqueza de la información recogida.

Para la construcción de la función de utilidad se incluyó como variable la población del destino, en miles de habitantes, según datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE. También se tuvo en cuenta la tarifa del servicio en miles de pesos ( $Ct_i$ ), incluyendo los trasbordos que debe realizar el usuario, el tiempo de viaje en minutos ( $Tv_i$ ) entre la zona de origen y la de destino, la frecuencia del servicio ( $FR_i$ ), el número de trasbordos promedio que debe realizar para ir de un origen a un destino ( $TR_i$ ) y una variable binaria ( $Pt_i$ ) que toma el valor de uno (1) si la zona posee un puerto, cero (0) si no.

Al igual que en el modelo de generación se tuvieron en cuenta variables adicionales a las presentadas, relacionadas con las actividades económicas de la zona o socioeconómicas de los usuarios, que no se incluyeron en el modelo por presentar alguna irregularidad en los



resultados.

La ecuación de utilidad se plantea con la forma funcional dada en la ecuación 5.7:

$$V_i = ASC_i + \beta_{Ct} Ct_i + \beta_{Tv} Tv_i + \beta_{Fr} Fr_i + \beta_{Tr} Tr_i + \beta_p P_i + \beta_{PT} PT_i \quad 5.7$$

Al estimar el modelo, se obtuvieron valores de los parámetros como se muestra en la Tabla 5.4. No se incluyeron las constantes específicas de las funciones, ya que se consideraron 96 destinos y a cada una le corresponde un parámetro diferente, sin embargo se pueden apreciar, junto con los demás resultados del modelo en el Anexo 10.

Las constantes varían entre -8 y 4.13, es decir que en general presentan una gran variabilidad, ajustándose a cada caso, no obstante los valores obtenidos de la prueba *t de student* son muy bajos, lo que indican que son poco significativas para el modelo. Así mismo la prueba realizada para la variable población y puerto dieron como resultado valores tan bajos que pueden considerarse nulos.

Tabla 5.4. Parámetros calibrados de la función de utilidad del modelo de elección de destino

Variable	Valor	t
Tarifa	-2,36 <sup>-2</sup>	-5,58
Tiempo de viaje	-2,72x10 <sup>-3</sup>	-4,69
Frecuencia	5,97x10 <sup>-2</sup>	15,21
Transbordo	-1,13	-15,14
Población	2,24x10 <sup>-4</sup>	0,00
Puerto	0,139	0,00
N	3665	
l(θ)	-6631,7	
Rho cuadrado	0,289	

Fuente: Elaboración propia

Del análisis del modelo se pudo comprobar que las constantes no resultaron significativas, de acuerdo a los resultados de la *t de Student*. Adicionalmente, un gran número de constantes adoptan valores cercanos a cero. Por esta razón se calibró un nuevo modelo sin tenerlas en cuenta, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 5.5.

Los resultados de este nuevo modelo son similares al modelo anterior, sin embargo en este caso, la variable puerto y población resultan significativas para el modelo.

En la elección de destino, se puede apreciar la alta importancia que tienen el número de transbordos y la frecuencia del vehículo en el modelo. De lo cual se concluye que las demoras adicionales que debe asumir el usuario al esperar el servicio iniciando el viaje o al

realizar un transbordo, resulta una importante influencia en la toma de decisión, ante la elección del destino.

Tabla 5.5. Parámetros calibrados de la función de utilidad del modelo de elección de destino

Variable	Valor	t
Tarifa	$-1,85 \times 10^{-2}$	-6,27
Tiempo de viaje	$-2,09 \times 10^{-3}$	-5,09
Frecuencia	$4,13 \times 10^{-2}$	21,38
Transbordo	-1,03	23,64
Población	$1,56 \times 10^{-4}$	4,90
Puerto	0,59	7,34
N	3665	
$l(\theta)$	-7191,05	
Rho cuadrado	0.230	

Fuente: Elaboración propia

El valor del tiempo calculado es de \$112 por minuto. En el modelo de partición modal, se realizó igualmente el cálculo del valor del tiempo, obteniendo que este corresponder a 80 pesos por minutos, lo cual es ligeramente inferior al resultante en este caso. Lo anterior puede deberse a que el modelo de partición modal se realizó de manera exclusiva en el municipio de Magangué, y con base en encuestas de preferencias declaradas. Dado que las preferencias declaradas corresponden a escenarios hipotéticos planteados a los usuarios, puede existir cierto sesgo en las respuestas. En contraposición en el modelo de demanda directa, se realizó con datos de encuestas de preferencia revelada, captada en todos los municipios en el interior del área de estudio.

La dualidad de los datos con que se generaron estos dos modelos, produce variaciones en los resultados del valor del tiempo, sin embargo permite interpretar que de establecer varias opciones para el mismo viaje, los usuarios intentarían reducir los gastos monetarios asociados al viaje, aunque para ello deban aumentar el tiempo de viaje y por ende reducir el valor del tiempo.

## 6 CONCLUSIONES

El modo fluvial constituye una alternativa eficiente y amigable con el ambiente para el transporte intermunicipal en algunas regiones de Colombia, principalmente en la zona de influencia del río Magdalena, ya que es la arteria fluvial más importante del país. El puerto que moviliza el mayor número de pasajeros está ubicado en el municipio de Magangué, seguido por El Banco y en tercer lugar Barrancabermeja. Cabe anotar que este último presenta mejores alternativas de transporte por carreteras y ferrovías a destinos cercanos que los primeros dos municipios.

De acuerdo al diagnóstico realizado se pudo notar que los usuarios del modo fluvial en general son cautivos, dado que gran parte de los viajes no cuenta con otros modos alternativos para desplazarse hacia sus destinos. De hecho, en general la mayoría de los viajes ocurren entre zonas relativamente cercanas, que en pocos casos superan los 150 km. Un aspecto interesante es que los viajes entre zonas externas representan solo el 10% del total.

A partir del análisis de los datos históricos del número de pasajeros que entran y salen en cada uno de los puertos, se logró establecer que es usual que exista un incremento en el número de viajes en los meses de diciembre y enero, respecto a los demás meses del año. No obstante, aparte de esta particularidad, no se establecen tendencias adicionales ni un comportamiento que se relacione de manera exclusiva con el transcurrir del tiempo, lo que supone que la generación y atracción de viajes están asociadas a distintos atributos.

Adicional a los datos obtenidos de las inspecciones fluviales, se requirió tomar información primaria para el desarrollo de la modelación del modo y si bien en la literatura se encuentran ejemplos puntuales de instrumentos para este propósito, están basados en otros modos como el carretero o el aéreo, recolectando información que en su totalidad no es relevante para el modo fluvial e ignoran datos que son esenciales para la caracterización de la demanda y oferta del transporte de pasajero por río. Con este objetivo, se diseñaron instrumentos de aforo vehicular que permite establecer las particularidades de las embarcaciones utilizadas en el modo fluvial y los detalles de su operación. Así mismo se generó un formato de encuestas de preferencias reveladas, que indaga sobre las características socioeconómicas y los detalles del viaje que se encuentra realizando el usuario; al igual que un formato de encuesta de preferencia declarada para obtener las elecciones de los usuarios del modo fluvial compitiendo con el modo carretero.

En cumplimiento con el tercer objetivo, se lograron determinar aspectos del transporte fluvial de pasajeros, mediante la modelación de la demanda y la oferta. De manera específica, de los modelos que caracterizan la demanda se percibió que el número de viajes en cada zona está fuertemente ligada al tamaño de la población, lo que resulta lógico; sin embargo, esta conclusión solo puede adaptarse a la zona de influencia del río, porque en

aquellas zonas donde el modo fluvial no representa una sólida alternativa de transporte, solo se generarán o atraerán viajes que tenga alguna etapa en modo fluvial, razón por la cual la accesibilidad también resultó ser una variable relevante en la generación y atracción de viajes.

En las zonas donde existen inspecciones fluviales e incluso en zonas cercanas se presentaran un mayor número de viajes, ya que la presencia de estas instituciones, además de un indicador de accesibilidad, también lo es del nivel de organización y de formalidad en la prestación del servicio.

A través del documento se han presentado enfoques alternativos para estimar la demanda de viajes en un corredor fluvial, en este caso el río Magdalena, en Colombia. Un primer enfoque sigue la secuencia del modelo clásico, en sus fases de generación, distribución y se incluyó además un modelo de elección modal, mientras que el segundo enfoque sigue la estimación de demanda directa. Dada la relativamente baja complejidad del sistema analizado, en el cual el número de viajes no es tan grande, ambos enfoques resultaron robustos y aplicables.

El análisis que se realizó de la elección modo, muestra que la demanda es altamente elástica respecto del costo y del tiempo de viaje. Adicionalmente se calculó el valor del tiempo, con el modelo de elección modal, obteniendo que para los usuarios es de 80,0 pesos el minuto, mientras que a partir de los cálculos del modelo de elección de destino se obtuvo un valor de 112,0 pesos el minuto. Lo cual ocurre debido a que el primer modelo se construyó a partir de elecciones de los usuarios en escenarios hipotéticos, mientras que en el segundo consisten en información de viajes donde los usuarios tomaron dicha decisión en situaciones reales. Se puede concluir por tanto, que los usuarios, si cuentan con varias alternativas, intentaran reducir los gastos económicos, aunque por ello incrementen su tiempo de viaje, disminuyendo igualmente el valor del tiempo.

Se pudo apreciar que el modo fluvial es sensible a los cambios de precio y tiempo de viaje y espera, mientras que el modo carretero (bus) es sensible al costo de la tarifa, pero no en igual magnitud que el modo fluvial y es inelástica respecto al tiempo de viaje.

El modelo de demanda directa permitió adaptar el comportamiento de viaje de los usuarios dadas unas características del viaje, destacando principalmente la influencia que obtiene la función generalizada de costo, es decir que el tiempo y costo son cruciales en la repartición de viajes a las distintas zonas.

Al analizar los resultados del modelo de elección de destino vemos la importancia de las variables de costo y tiempos de viaje en la función de utilidad del usuario, sin embargo las variables de transbordo y frecuencia cobran importancia en este modelo, ya que resumen ciertos aspectos cualitativos que no se reflejan en el costo o el tiempo de viaje, como la comodidad y la seguridad. No obstante resulta interesante evaluar dichas variables cualitativas y su impacto en el transporte de pasajeros en investigaciones futuras.

En el análisis del modelo se obtuvo que el número de viajes es inelástica a las variables analizadas, es decir que se deben presentar grandes variaciones en estas para ver cambios en el número de viajes de pasajeros.

En los modelos no se realizó un análisis de la demanda discriminando según motivo de viaje o según nivel de ingreso. Futuras investigaciones pueden orientarse a considerar estas variables en el análisis. Una aplicación relevante de los modelos estimados consiste en definir escenarios de planificación evaluando políticas e intervenciones sobre la red, en particular la mejora de los niveles de servicio o la introducción de nuevos arcos en la red, tanto fluviales como carreteras. Igualmente, pueden generarse investigación acerca de la estimación de modelos que involucren percepciones por parte de los usuarios de variables de difícil medición directa como la comodidad, el confort y la seguridad.

## 7 REFERENCIA

- Box. G, Jenkins. G y Reinsel. G (2005). Time Series Analysis Forecasting and Control.
- Cascetta. E, Pagliara. F y Papola. A (2006) Alternative approaches to trip distribution modeling: a retrospective review and suggestions for combining different approaches
- Cherchi E and Ortúzar J. Income, Time Effects and Direct Preferences in a Multimodal Choice Context: Application of Mixed RP/SP Models with Non-Linear Utilities.
- Daly, A.J. (1997) Improved methods for trip generation. Proceeding 25<sup>th</sup> European Transport Forum. Brunel University, Inglaterra, Septiembre.
- Dijkstra E.W (1959). Note on two problems in connection with graphs (spanning tree, shortest path). Numerical Mathematics 1.
- Domencich. T and McFadden D (1975). Urban Travel Demand: A Behavioral Analysis.
- F. J. Anscombe (1973),. Graphs in Statistical Analysis, *the American Statistician*, Vol. 27, No. 1. pp. 17-21.
- González R (1995), La demanda de transporte de pasajeros en el trayecto Gran Canaria-Tenerife. Una aplicación de modelos de elección discreta. Tesis Universidad de la laguna, España.
- Jara Díaz S (2007) Transport Economic Theory. Elsevier.
- Kou Weihua, Li Zongping (ICTE 2009).. The shortest path algorithm basing on restricted condition in traffic network. International Conference on Transportation Engineering.
- Matas A(1991), La demanda de transporte urbano: Un análisis de las elasticidades y valoración del tiempo., Universidad de Barcelona.
- Michael Florian, Heinz Spiess. On Binary Mode Choice/Assignment Models. Transportation Science, Vol. 17, No. 1, February 1983, pp. 32-47.
- Ortúzar, J. D., & Willumsen, L.G. (2011). Modelling Transport. Jhon Wiley & Son Ltda.
- Oyedepo, Olugbenga; Joseph, Makinde; Oluyemisi, Opeyemi (2009). Regression Model of Household Trip Generation of Ado-Ekiti Township in Nigeria. European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.28 No.1 pp.132-140.
- Ramirez, O.F., Sierra, N.L. (1989) Distribucion de viajes en el proceso tradicional de planteamiento de transporte urbano. Tesis no publicada. Medellín. Universidad Nacional de Colombia.
- Sheffi J. Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods.1985.

- Valerian Kwigizile and Hualiang Harry Teng. Comparison of Methods for Defining Geographical Connectivity for Variables of Trip Generation Models.